

การคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพ  
สำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด



นางสาวมนวิกาณ์ ขจรบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SCREENING OF NITRIFYING BACTERIAL SEED APPLIED AS BIOFILTER  
IN THE RECIRCULATION WATER OF CLOSED-SYSTEM SHRIMP POND



Miss Monwikan Kajohnboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับ  
ตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด

โดย

นางสาวมนวิกานต์ ขจรบุญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์

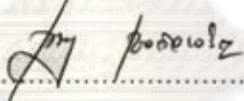
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

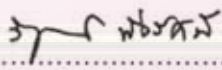
ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีนิตย์ เตชะเสน)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. วรเทพ มุขวรรณ)

มนวิกานต์ ขจรบุญ : การคัดเลือกหัวเชื้อ ไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพ สำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด (SCREENING OF NITRIFYING BACTERIAL SEED APPLIED AS BIOFILTER IN THE RECIRCULATION WATER OF CLOSED-SYSTEM SHRIMP POND) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. วิบูลย์ลักษณะ ทุ่งรัมย์, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข, 183 หน้า.

การคัดเลือกตัวกรองไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดแอมโมเนียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มในสถานที่จริง 4 แห่ง ได้แก่ (1) ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งในโรงเรียน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2) ดั่งบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (3) บ่อคินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จังหวัดฉะเชิงเทรา และ (4) บ่อคินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี โดยการแช่ตัวกลางพลาสติก (R-190) ลงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่าตัวกรองชีวภาพจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงที่สุด คือ มีค่าเฉลี่ย  $47.20 \pm 1.86$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งสูงกว่าตัวกรองจากแหล่งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) จึงคัดเลือกตัวกรองจากแหล่งดังกล่าวเพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่มีผลต่อการเก็บรักษาตัวกรองไนตริไฟิเคชันระยะยาวในห้องปฏิบัติการ โดยภายหลังการบ่มตัวกรองเป็นเวลา 3 - 6 เดือนที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างๆ กัน ได้แก่ 0 0.5 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. แล้วสุ่มมาวิเคราะห์ พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าอยู่ในช่วง 30-120 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน โดยการเพิ่มเวลาและความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ในการบ่มตัวกรองมีผลร่วมกันที่จะทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวกรองในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะเหมือนจริงของระบบบ่อไร้คินกลางแจ้ง ระหว่างถังควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถังทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก. ความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม. ในน้ำทะเลความเค็ม 30 เทอสมู ปริมาตร 450 ลิตร ปรับค่าความเป็นด่างของน้ำให้มีค่า 150 มก./ล. เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียมาล่วงหน้าสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลผลิตกุ้งที่มีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดสูงสุด โดยน้ำในถังมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์เฉลี่ย  $0.25 \pm 0.45$  และ  $0.80 \pm 1.32$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ตัวกรองชีวภาพมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด  $142.40 \pm 3.28$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน โดยเมื่อนำตัวกรองชีวภาพทั้งหมดที่ตรึงหัวเชื้อจากแหล่งต่างๆ มาทำการศึกษาเปรียบเทียบความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บนพื้นผิวด้วยเทคนิค PCR-DGGE พบว่าองค์ประกอบชนิดของจุลินทรีย์จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ มีความคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อนำมาเพิ่มจำนวนโดยการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟิเคชันในสภาวะห้องปฏิบัติการจะมีผลให้องค์ประกอบชนิดของ AOB บนตัวกรองเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งภายหลังการนำหัวเชื้อดังกล่าวที่ทำการตรึงในห้องปฏิบัติการไปใช้ในการบำบัดน้ำในถังเลี้ยงกุ้ง พบว่าองค์ประกอบชนิดของ AOB จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นชนิดของ AOB ที่มีอยู่ตามธรรมชาติภายในถังทดลอง

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....มนวิกานต์ ขจรบุญ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 4970512421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : SHRIMP POND / BIOFILTER / NITRIFICATION / AMMONIA-OXIDIZING BACTERIA / AMMONIA REMOVAL RATE

MONWIKAN KAJOHNBON : SCREENING OF NITRIFYING BACTERIAL SEED APPLIED AS BIOFILTER IN THE RECIRCULATION WATER OF CLOSED-SYSTEM SHRIMP POND.  
ADVISOR : ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D. CO-ADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 183 pp.

This study investigated the ammonia removal rate of nitrifying bacteria isolated from aquaculture ponds. Bacteria was collected from 4 sites *i.e.* (1) the shrimp culture pond at the Center of Excellence for Marine Biotechnology, Chulalongkorn University, (2) the marine aquarium filtration tank, Bangsaen Institute of Marine Science, Burapha University, (3) the outdoor shrimp pond in Chachoengsao Province, and (4) the outdoor spotted snail culture pond in Phetchaburi Province. The isolation was performed by immersing plastic biofilter media (R-190) in the pond for 45 days. The results showed that biofilter with bacterial seeding from the shrimp pond at Chulalongkorn University had the highest ammonia removal rate which was  $47.20 \pm 1.86 \text{ mgNH}_4\text{-N/m}^2/\text{d}$ . This removal rate was significantly higher than those of other sources ( $P < 0.05$ ). In the second part, the effect of ammonia concentration on the ammonia removal rate of the acclimated nitrification biofilter was examined. The experiment was performed at different concentrations of ammonia *i.e.* 0, 0.5, 2 and 10 mg  $\text{NH}_4\text{-N/L}$  for 3-6 months. The results showed that the ammonia removal rate was in the range between 30-120 mg $\text{NH}_4\text{-N/L}$ . Statistical analysis showed that there was an interaction between time and ammonia concentration during the biofilter acclimation period.

In the third part, the study investigated the efficiency of biofilter for ammonia removal in the simulated outdoor shrimp pond. The simulated shrimp pond consisted of two control and one treatment ponds. The first control had no biofilter and the other had un-acclimated biofilter. The treatment pond was supplied with active biofilter (pre-acclimated using nitrifying bacteria seeding from shrimp pond at Chulalongkorn University). All tanks were filled with 450 L of 30 PSU seawater with the alkalinity of 150 mg/L. White shrimp (*Penaeus vannamei*) was cultivated at the density 47 shrimp/m<sup>2</sup> without water exchange throughout the 90-day trial. The results showed that biofilter could maintain good water quality in treatment pond in which ammonia and nitrite concentrations were  $0.25 \pm 0.45 \text{ mgNH}_4\text{-N/L}$  and  $0.80 \pm 1.32 \text{ mgNO}_2\text{-N/L}$ , respectively. The active biofilter from the treatment pond had the maximum ammonia removal rate of  $142.40 \pm 3.28 \text{ mgNH}_4\text{-N/L}$ . Shrimp growth in the treatment pond was higher than that of control ponds. The last experiment investigated ammonia oxidizing bacterial (AOB) communities on biofilter. The results according to PCR-DGGE of 16S rDNA showed that AOB composition on the biofilter isolated from each sites was similar. Acclimation of nitrifying bacteria under laboratory condition resulted in the change of AOB composition on the biofilter. When pre-acclimated biofilter was applied to shrimp pond, AOB composition was then change to the natural AOB composition found in the water of shrimp pond.

Department:.....Environmental Engineering.....Student's Signature..... Monhikan Kajohnbon.....  
Field of Study:.....Environmental Engineering.....Advisor's Signature..... Wiboonluk P.....  
Academic Year:.....2008.....Co-Advisor's Signature..... Sorawit Powtongsook.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือตลอดทุกขั้นตอนในการทำวิจัยและตรวจทานแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน และ ดร.วรเทพ มุขสุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจทานวิทยานิพนธ์และคำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปยากร ที่ได้ให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ตลอดจนคำแนะนำในการวิเคราะห์ชีววิทยาระดับโมเลกุล และขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กรุณามอบความรู้อันเป็นประโยชน์ คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการศึกษา ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยหลักจากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

ขอขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนนิติตระดับปริญญาโทเพื่อไปเสนอผลงานวิชาการในต่างประเทศ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และสารเคมีในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่มะลิวัลย์ ที่ได้ให้คำแนะนำเทคนิคในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณพี่วัลย์ภรณ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ชีววิทยาระดับโมเลกุลทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับมิตรภาพ กำลังใจ ตลอดจนความช่วยเหลือทั้งในด้านการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่มอบความรัก กำลังใจ และสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆด้าน ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม.....	5
2.2 ปัจจัยคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	6
2.3 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด.....	11
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ.....	14
2.5 ชนิดของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ.....	18
2.6 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ.....	19
2.7 สารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง.....	21
2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง.....	31
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	31
3.2 การดำเนินการทดลอง.....	33
การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่าน การตรึงหัวเชื้อจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ.....	33
การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมต่อการเก็บ รักษาตัวกรองชีวภาพระยะยาว.....	39

การทดลองส่วนที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองที่ ทำการตรึงเชื้อเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่ มีการจำลองสภาวะเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง.....	44
การทดลองส่วนที่ 4 การวิเคราะห์หาความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บน ตัวกรองชีวภาพ.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	57
4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อจากระบบ เลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ.....	57
4.2 ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพระยะ ยาว.....	71
4.3 ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพในการบำบัดคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งระบบ บ่อไร้ดินกลางแจ้ง.....	89
4.4 การเปลี่ยนแปลงประชากรแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนียบนตัวกรอง ชีวภาพ.....	112
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	116
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	118
รายการอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก.....	128
ภาคผนวก ข.....	134
ภาคผนวก ค.....	143
ภาคผนวก ง.....	158
ภาคผนวก จ.....	168
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	183



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่มีผลกระทบต่อการเลี้ยงกุ้ง.....	8
ตารางที่ 2.2	ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อกุ้งและปลาในระบบเพาะเลี้ยง สัตว์น้ำ.....	9
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.4	พื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพจากงานวิจัยต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.5	อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ.....	14
ตารางที่ 2.6	ปริมาณแอมโมเนียอิสระและผลกระทบต่อกุ้งทะเล.....	24
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1.....	35
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.....	41
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3.....	46
ตารางที่ 3.4	คุณภาพน้ำ ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ภายในถังเลี้ยงกุ้ง.....	49
ตารางที่ 3.5	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์.....	51
ตารางที่ 3.6	แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์.....	51
ตารางที่ 3.7	แสดงชุด Primer สำหรับ 16S rDNA ที่ใช้ในงานวิจัย.....	54
ตารางที่ 3.8	สารละลายที่ใช้ในการย้อมเจลและขั้นตอนการเตรียม.....	56
ตารางที่ 4.1	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัว กรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งต่างๆ.....	62
ตารางที่ 4.2	อัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิง แบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ 4 แหล่ง.....	68
ตารางที่ 4.3	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัว กรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งต่างๆใน ห้องปฏิบัติการ.....	70
ตารางที่ 4.4	คุณภาพน้ำภายในถังปฏิกรณ์ที่ทำการบ่มตัวกรองชีวภาพที่ระดับความ เข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน.....	72
ตารางที่ 4.5	คุณภาพน้ำของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัด แอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากแอมโมเนียความเข้มข้น ต่างๆ.....	82

ตารางที่ 4.6	อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกันในเวลาต่างๆของการทดลอง.....	84
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง.....	84
ตารางที่ 4.8	ทบทวนเอกสารอัตราการบำบัดแอมโมเนียของงานวิจัยอื่นๆ.....	85
ตารางที่ 4.9	คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองเมื่อเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม่เป็นเวลา 90 วัน.....	97
ตารางที่ 4.10	ผลการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม่อายุ 90 วัน.....	109
ตารางที่ 4.11	ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบถังเลี้ยงกุ้งตลอดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง.....	111
ตารางที่ 4.12	รายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค PCR-DGGE.....	113
ตารางที่ ข-1	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆจากการทดลองที่ 4.1.1.....	134
ตารางที่ ข-2	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.1.....	136
ตารางที่ ข-3	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 จากการทดลองที่ 4.1.2.....	137
ตารางที่ ข-4	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 จากการทดลองที่ 4.1.2.....	139
ตารางที่ ข-5	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆจากการทดลองที่ 4.1.3.....	141

ตารางที่ ข-6	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.3.....	142
ตารางที่ ค-1	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนที่เข้าและออกจากถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก. ในโตรเจน/ล.....	143
ตารางที่ ค-2	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก. ในโตรเจน/ล.....	145
ตารางที่ ค-3	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก. ในโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-6 เดือน.....	147
ตารางที่ ค-4	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก. ในโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-3 เดือน.....	150
ตารางที่ ค-5	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก. ในโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-6 เดือน.....	152
ตารางที่ ค-6	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก. ในโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-3 เดือน.....	155
ตารางที่ ค-7	คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0, 0.5 2 และ 10 มก. ในโตรเจน/ล.....	156
ตารางที่ ง-1	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง.....	158
ตารางที่ ง-2	คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง	161
ตารางที่ ง-3	น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการทดลอง.....	164

ตารางที่ ง-4    การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์  
 ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุด  
 ควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองใหม่และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองที่ตรง  
 หัวเชื้อแล้ว..... 166



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

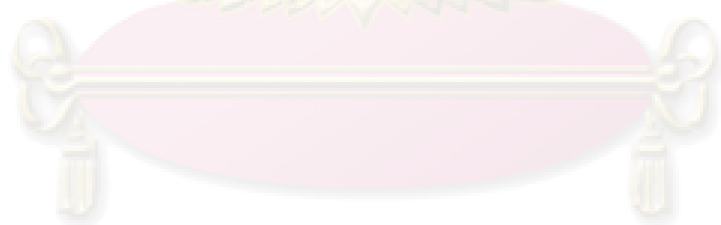
## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟบนผิวตัวกรองชีวภาพ.....	12
รูปที่ 2.2 ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปและสะสมอยู่ในส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด.....	22
รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 1.....	34
รูปที่ 3.2 วัสดุพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น R-190.....	36
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสถานที่จริงของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆที่ได้นำตัวกลางพลาสติกไปทำการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน.....	37
รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองโดยตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย.....	38
รูปที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 2.....	40
รูปที่ 3.6 ตัวกลางพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น BCN-009.....	42
รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์และถังปฏิกรณ์สำหรับการบ่มตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกัน.....	43
รูปที่ 3.8 การทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน.....	44
รูปที่ 3.9 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 3.....	45
รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง.....	47
รูปที่ 3.11 การศึกษาอัตราการเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมโดยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนักกุ้ง.....	48
รูปที่ 4.1 ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ เป็นเวลา 45 วัน.....	58
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม.....	60
รูปที่ 4.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพใหม่ที่เหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพไนตริฟิเคชันจากหัวเชื้อที่ตรึงได้จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยบูรพา.....	63

รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ ภายหลังการเหนี่ยวนำให้เกิดการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่คัดแยก จากจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและมหาวิทยาลัยบูรพาทุกๆ 2 สัปดาห์ เป็น ระยะเวลา 2 เดือน.....	64
รูปที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนโดยตัว กรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากตัวอย่างน้ำและ ดินตะกอนในห้องปฏิบัติการ.....	67
รูปที่ 4.6	ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนที่เข้าและออกจากถัง ปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก. ในโตรเจน/ล.....	73
รูปที่ 4.7	ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนที่เข้าและออกจากถัง ปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก. ในโตรเจน/ล.....	73
รูปที่ 4.8	ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนที่เข้าและออกจากถัง ปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก. ในโตรเจน/ล.....	73
รูปที่ 4.9	ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนที่เข้าและออกจากถัง ปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก. ในโตรเจน/ล.....	74
รูปที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงสารประกอบในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชัน ที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 1 เดือน.....	75
รูปที่ 4.11	การเปลี่ยนแปลงสารประกอบในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชัน ที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 2 เดือน.....	76
รูปที่ 4.12	การเปลี่ยนแปลงสารประกอบในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชัน ที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 3 เดือน.....	77
รูปที่ 4.13	การเปลี่ยนแปลงสารประกอบในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชัน ที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 และ 2 มก. ในโตรเจน/ล. เป็น ระยะเวลา 4-6 เดือน.....	80
รูปที่ 4.14	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัว กรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 และ 2 มก. ในโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน.....	87

รูปที่ 4.15	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2 เดือน.....	88
รูปที่ 4.16	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 1 และ 3 เดือน.....	88
รูปที่ 4.17	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง 90 วัน	92
รูปที่ 4.18	ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง 90 วัน.....	94
รูปที่ 4.19	ตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองในวันที่ 52 และ 90 ของการทดลองเลี้ยงกุ้ง.....	95
รูปที่ 4.20	สภาพความเป็นต่างในมวลน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง 90 วัน.....	96
รูปที่ 4.21	สภาพของถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองในวันที่เริ่มทำการทดลองและเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน.....	98
รูปที่ 4.22	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ตรึงเชื้อมาจากบ่อเลี้ยงกุ้งของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก่อนเริ่มทดลองเลี้ยงกุ้ง.....	99
รูปที่ 4.23	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 60 วัน.....	100
รูปที่ 4.24	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน.....	102
รูปที่ 4.25	อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่สูมตัวอย่างมาจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว ก่อนเริ่มต้นการทดลองและในวันที่ 60 และ 90 ของการทดลอง.....	103

รูปที่ 4.26	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจาก ถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหิวเชื้อแล้วก่อนการทดลองและวันที่ 30, 60 และ 90 ของการทดลอง.....	105
รูปที่ 4.27	น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสาม ชุดการทดลองในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการทดลอง.....	107
รูปที่ 4.28	ภาพถ่ายกุ้งในระบบทดลองเมื่อทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 90 วัน.....	108
รูปที่ 4.29	จำนวนแถบและการเคลื่อนที่ของดีเอ็นเอบน DGGE ที่สกัดแยกจากแบคทีเรีย ที่ตรึงบนตัวกรองชีวภาพจากการทดลองต่างๆ.....	114
รูปที่ ก-1	กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย.....	128
รูปที่ ก-2	กราฟมาตรฐานไนโตรเจน.....	129
รูปที่ ก-3	กราฟมาตรฐานไนเตรตวิธีการวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์แคดเมียม.....	131
รูปที่ ก-4	กราฟมาตรฐานไนเตรต.....	132



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบบ่อดินกลางแจ้ง ระบบบ่อไร้อินกลางแจ้ง (บ่อซีเมนต์หรือบ่อดินที่ปูพื้นด้วยพลาสติกที่ตั้งอยู่กลางแจ้ง) และระบบบ่อในโรงเรือน โดยแต่เดิมการเพาะเลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่จะใช้ระบบบ่อดินกลางแจ้งซึ่งอาศัยกระบวนการบำบัดน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่บ่อดินกลางแจ้งมักเกิดปัญหาอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ปัญหาคุณภาพน้ำเนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยความหนาแน่นสูง ปัญหาสภาพดินและการบำบัดดินภายหลังการเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งในระบบปิดด้วยบ่อไร้อินกลางแจ้งโดยจะเป็นบ่อที่ปูพื้นด้วยผ้าใบ ซึ่งระบบดังกล่าวมักพบปัญหาการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมทางนิเวศวิทยาภายในบ่อไม่เอื้ออำนวยให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ได้อย่างสมบูรณ์ (มะลิวัลย์ และคณะ, 2550) โดยที่ความเป็นพิษของสารประกอบไนโตรเจนทั้งสองชนิดอาจส่งผลทำให้กุ้งเกิดความเครียด อ่อนแอ และตายในที่สุด

การบำบัดแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำโดยการเปลี่ยนรูปแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงให้กลายเป็นสารประกอบไนโตรเจนในรูปไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ที่มีความเป็นพิษต่ำด้วยตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) ที่บำบัดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ผิวของตัวกรอง (Pollard, 2006) ซึ่งแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Ammonia-oxidizing Bacteria ; AOB) จะออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ จากนั้นไนไตรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite-oxidizing Bacteria ; NOB) จะออกซิไดซ์ไนไตรต์ไปเป็นไนเตรตตามลำดับ (Timmon และ Losordo, 1994) โดยปกติแล้วกระบวนการไนตริฟิเคชันจะเป็นขั้นตอนที่มีผลกับการจำกัดอัตรา (Rate limiting step) เนื่องจากแบคทีเรียในกระบวนการนี้เป็นแบคทีเรียเฉพาะกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก และมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมสูง ซึ่งมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่มที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและมีอัตราการเจริญอย่างรวดเร็วกว่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวการพัฒนาแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟิเคชันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการกำจัดไนโตรเจนในระบบบำบัดคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้ง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งแบบปิด โดยเน้นที่การคัดเลือกหัวเชื้อที่มีแบคทีเรียกลุ่ม AOB และทดลองนำหัวเชื้อที่คัดเลือกได้มาตรึงบนตัวกลางสำหรับการเตรียมตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งานต่อไป โดยทำการตรึงหัวเชื้อแบคทีเรียจากระบบสิ่งแวดล้อมที่มีสภาพค่อนข้างใกล้เคียงกับสภาวะที่จะถูกนำมาใช้งานจริง ซึ่งก็คือระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ ได้แก่ ตัวอย่างน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง บ่อบำบัดของสถานแสดงพันธุ์สัตว์น้ำเค็ม และระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เพาะเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน โดยในขั้นตอนจะทำการศึกษาความสามารถในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia-oxidizing Activity) ของหัวเชื้อจากแต่ละแหล่งเปรียบเทียบกับ จากนั้นจะทดลองนำหัวเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงสุดมาตรึงบนตัวกลางแล้วนำไปทดลองใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะการเลี้ยงกุ้งในระบบบ่อไร่คืนกลางแจ้ง โดยจะทำการทดสอบและติดตามค่าความสามารถในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ตลอดจนคุณภาพน้ำในถังของชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพและชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อคัดเลือกหัวเชื้อ ไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบสิ่งแวดล้อมซึ่งมีสภาพใกล้เคียงและเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะจริงของการเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งาน โดยการตรึงหัวเชื้อที่คัดเลือกได้บนตัวกรองและทำการทดสอบภายใต้สภาวะใช้งานจริงของระบบบำบัดคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 หัวเชื้อเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจากตัวอย่างน้ำของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ 4 แหล่ง ได้แก่

1. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งแบบความหนาแน่นสูง ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวข้อจากระบบเพาะเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน
2. ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวข้อจากระบบคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับสถานแสดงพันธุ์สัตว์น้ำ
3. บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งของบรรมจฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวข้อจากระบบธรรมชาติแบบบ่อดินกลางแจ้ง
4. บ่อดินเลี้ยงหอยหวานของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการเพาะเลี้ยงหอยหวาน สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวข้อจากระบบบ่อดินเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง

1.3.2 ตัวกรองที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวกลางพลาสติกโพลีเอธิลีนชนิดช่วยกระจายการไหลของน้ำให้ทั่วทั้งพื้นผิว (Random Flow Plastic Media) รุ่น R-190 ของบริษัท Aqua Nishihara Corporation LTD. และตัวกลางพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น BCN-009 (2H, Germany)

1.3.3 แหล่งของแอม โมเนีย คือ แอมโมเนียมคลอไรด์ โดยการทดลองส่วนที่ 1 ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. การทดลองส่วนที่ 2 จะใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ที่มีค่าแตกต่างกัน 4 ค่า คือ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. สำหรับการทดลองส่วนที่ 3 ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

1.3.4 น้ำทะเลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำทะเลผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าความเค็มเท่ากับ 30 พีเอสยู

1.3.5 สภาวะจำลองของการเลี้ยงกุ้งในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก. ความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม. ในน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ด้วยอาหารที่มีขายตามท้องตลาดในถังเลี้ยงกุ้งขนาด 500 ลิตร บริเวณภายนอกอาคารที่มีอากาศถ่ายเทและแสงแดดส่องถึง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นการคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและทดลองนำหัวเชื้อที่คัดเลือกได้มา  
ตรึงบนตัวกรองสำหรับการเตรียมตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งานในระบบบำบัด  
คุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด
- 1.4.2 เป็นการเพิ่มความรู้เกี่ยวกับแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงบนตัวกรองชีวภาพในระบบ  
บำบัดคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด ซึ่งในปัจจุบันมีอยู่อย่าง  
จำกัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่ทำรายได้สูงสุดของประเทศ ทำให้มีการพัฒนารูปแบบของระบบการเพาะเลี้ยงตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณสูงและมีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่ง (Hart และ O'sullivan, 1993) ได้แบ่งระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่

##### 2.1.1 ระบบเปิด (Open systems)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มนั้นจะเป็นการเพาะเลี้ยงระบบเปิด ซึ่งจะมีการนำน้ำทะเลที่ใช้สำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำจากแหล่งธรรมชาติขึ้นมาโดยตรงหรืออาจจะมีการกรองอย่างง่าย จากนั้นน้ำทะเลจะถูกนำเข้ามาในระบบการเลี้ยง เมื่อน้ำผ่านระบบการเลี้ยงแล้วก็จะถูกปล่อยทิ้งกลับสู่ธรรมชาติโดยตรงในบริเวณที่ห่างจากจุดนำน้ำเข้า หรืออาจจะให้น้ำผ่านบ่อพักเพื่อให้กระบวนการบำบัดตามธรรมชาติช่วยบำบัดทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น แต่จะไม่มีการนำน้ำนั้นกลับมาใช้ใหม่โดยจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำอย่างเต็มที่ ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิดจะต้องมีแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีคุณภาพน้ำเหมาะสมตลอดเวลา หากบางช่วงเวลาถ้าคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมก็ไม่สามารถนำน้ำนั้นมาใช้ประโยชน์ได้ วิธีการแก้ไขปัญหานั้นสามารถทำได้โดยการเลือกสถานที่ทำการเลี้ยงสัตว์น้ำที่เหมาะสมมีน้ำทะเลที่สะอาดและคงที่ตลอดปี แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบเปิดจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม เนื่องจากของเสียจะถูกถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่มีกระบวนการบำบัดและยังอาจก่อให้เกิดการระบาดของโรคสัตว์น้ำที่เกิดจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำได้

##### 2.1.2 ระบบกึ่งเปิด (Semi-open systems)

เป็นระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการลดปริมาณการเปลี่ยนถ่ายน้ำลง หรือมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบางช่วง ซึ่งทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นสูงไม่ว่าจะเป็นเรื่องของอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ ความสามารถในการเปิดและปิดระบบ เมื่อคุณภาพน้ำทะเลภายนอกเหมาะสมและไม่เหมาะสม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบนี้จำเป็นต้องเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการจัดการ ทั้งคุณภาพของน้ำบ่อเลี้ยง ความสะอาดและอื่นๆ ซึ่งระบบการเพาะเลี้ยงแบบระบบกึ่งเปิดจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าระบบเปิดเนื่องจากมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำน้อยกว่า

### 2.1.3 ระบบปิด (Closed or recirculating systems)

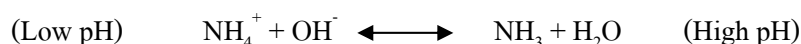
การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดหรือระบบปิดนั้น เป็นระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการปรับสภาพน้ำที่มีการใช้แล้วในบ่อเลี้ยงให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากในระบบจะมีการขับถ่ายของเสียจากสัตว์น้ำและเศษอาหารที่เหลือในบ่อเลี้ยงซึ่งจะทำให้ น้ำในระบบมีคุณภาพลดลง ระบบบำบัดคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนกรองตะกอนโดยใช้การกรองผ่านชั้นทราย การใช้ผ้ากรอง หรือการใช้วัสดุกรองชนิดต่างๆที่มีใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนแยกโฟมนั้นจะทำการแยกโฟมที่เกิดจากการละลายของโปรตีนและไขมันออกจากน้ำ ส่วนการบำบัดน้ำจะอาศัยกระบวนการไนตริฟิเคชันซึ่งจะใช้แบคทีเรียช่วยในการเปลี่ยนของเสียแอมโมเนียและไนไตรต์ให้เป็นไนเตรตที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า ทำให้สามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้เลี้ยงสัตว์น้ำได้ใหม่เป็นระยะเวลานาน โดยในส่วนของกระบวนการไนตริฟิเคชันจะจัดระบบให้มีออกซิเจนสูง โดยการเป่าอากาศอย่างแรงและมีวัสดุให้แบคทีเรียยึดเกาะ และทำการฆ่าเชื้อโรค โดยวิธีที่นิยมใช้คือการใส่แสงอัลตราไวโอเลตและการใช้โอโซน ซึ่งมักเป็นการบำบัดในขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำน้ำหมุนเวียนกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยง ปัญหาสำหรับระบบนี้คือการดูแลรักษาระบบทำได้ยาก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมแยกส่วนบำบัดต่างๆดังที่กล่าวมาแล้วออกจากกันเป็นบ่อบำบัดแต่ละบ่อซึ่งจะทำให้การควบคุมระบบบำบัดทำได้ง่ายขึ้น

## 2.2 ปัจจัยคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก ปัญหาที่เกิดจากการที่น้ำมีคุณภาพน้ำแย่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโต การเกิดโรค รวมถึงการติดโรคจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำ หรืออาจนำไปสู่การตายของสัตว์น้ำได้ โดยคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่

### 2.2.1 แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียที่พบในน้ำจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ (Timmons และคณะ, 2002) โดยแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมไอออน เมื่อค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนของแอมโมเนียสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากขึ้น แต่ถ้าค่าพีเอชของน้ำต่ำลงจะทำให้อัตราส่วนของแอมโมเนียมไอออนมากขึ้น ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำต่ำลง (Spotte, 1979) ดังสมการ



ดังนั้นความเป็นพิษของแอมโมเนียจึงมีความสัมพันธ์กับความเป็นด่างของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลทำให้พีเอชของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง (Bitton, 1994) โดยทั่วไปในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระเพียง 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. สามารถเป็นพิษรุนแรงต่อสัตว์น้ำหลายชนิดได้ (มันสิน ตันกุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2536) และความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. จะเป็นอันตรายต่อปลา (VanRijn และคณะ, 1990) สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้ง ปลาหมึก และหอย ควรมีความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่เกิน 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) ซึ่งระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) นอกจากนี้การให้อาหารสัตว์น้ำในปริมาณมากในบ่อที่มีการเลี้ยงอย่างหนาแน่น อาจทำให้แอมโมเนียมีปริมาณสูงมากเกินไป จากรายงานของ Avnimelech และ Rityo (2003) กล่าวว่าโปรตีนร้อยละ 25-30 ในอาหารจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียในน้ำ ซึ่งแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดได้ เนื่องจากแอมโมเนียในน้ำมีความเข้มข้นสูงกว่าแอมโมเนียในเลือดเป็นผลทำให้พีเอชของเลือดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆและทำให้สัตว์น้ำมีความต้องการออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์กุล, 2547)

### 2.2.2 ไนไตรต์ (Nitrite)

ความเป็นพิษของไนไตรต์ต่อสัตว์น้ำเกิดจากการที่ไนไตรต์ไปออกซิไดซ์เหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบินจึงทำให้เลือดไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ ทำให้สัตว์น้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน โดยทั่วไปความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำเต็มควรมีค่าไม่เกิน 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. และความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรมีค่าไม่เกิน 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) ซึ่งความเป็นพิษของไนไตรต์สามารถถูกยับยั้งได้ด้วยคลอรีนในน้ำ โดยน้ำทะเลซึ่งมีคลอรีนสูงจะทำให้เกิดความไม่เป็นพิษของไนไตรต์ต่อสัตว์น้ำค่อนข้างต่ำ ระดับความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและค่าพีเอชของน้ำลดลง ดังนั้นการป้องกันปัญหาความเป็นพิษของไนไตรต์สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอชของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้อยู่ในช่วง 7.5-8.5 และจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและการให้อากาศอย่างเพียงพอจึงจะสามารถป้องกันปัญหาที่เกิดจากความเป็นพิษของไนไตรต์ได้ (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์กุล, 2547)

### 2.2.3 ไนเตรต (Nitrate)

ไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ การบำบัดคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะอาศัยการเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรต์ให้มาอยู่ในรูป

ไนเตรตแทน ซึ่งไนเตรตในปริมาณต่ำจะไม่มีผลต่อสัตว์น้ำ แต่เมื่อมีการสะสมไนเตรตในปริมาณสูงมากขึ้นจะมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ โดยทั่วไปในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะควบคุมระดับความเข้มข้นของไนเตรตไม่ให้เกิน 50 มก.ไนโตรเจน/ล. (Whiston และคณะ, 1994) และจากรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ได้เสนอว่าในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 100 มก.ไนโตรเจน/ล. เพราะถ้าความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่านี้จะทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียดซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตได้

#### 2.2.4 ความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง หมายถึง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ ซึ่งสามารถแสดงได้จาก  $-\log_{10}[\text{H}^+]$  (Boyd, 1998) โดยค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้สัตว์น้ำเกิดอาการเครียด และมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ โดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าอยู่ระหว่าง 7.8-8.5 (Hart และ O'sullivan, 1993) โดยถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่าช่วงนี้จะมีผลทำให้สัตว์น้ำมีการเจริญเติบโตช้า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะทำให้สารพิษชนิดอื่นมีการแตกตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ เช่น เมื่อค่าพีเอชสูงจะทำให้พิษของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น ส่วนที่พีเอชต่ำจะทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นพิษมากขึ้น เป็นต้น (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537)

ตารางที่ 2.1 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่มีผลกระทบต่ออาการเลี้ยงกุ้ง (มันสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2536)

ความเป็นกรด-ด่าง	ผลกระทบ
ต่ำกว่า 4	ตาย
4-5	ไม่สืบพันธุ์
4-6	เติบโตช้า
6.5-9	เติบโตได้ดี
9-11	เติบโตช้า
9.5-11	ไม่สืบพันธุ์
สูงกว่า 11	ตาย

#### 2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ออกซิเจนมีความสำคัญมากที่สุดในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆของร่างกาย ในทางปฏิบัติของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควร



พยายามควบคุมไม่ให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 4 มก./ล. (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกุล, 2547) และจากรายงานของ Lawson (1995) เสนอว่าในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5-6 มก./ล. ซึ่งการขาดแคลนออกซิเจนจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เช่น ทำให้อัตราการฟักไข่ต่ำลง ตัวอ่อนไม่แข็งแรงและผิดปกติ ประสิทธิภาพในการย่อยอาหารลดลง และมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำได้ (คณิต ไชยาคำ และ ยงยุทธ ปริดาลัมพะบุตร, 2537) นอกจากนี้ถ้าในน้ำออกซิเจนไม่พอจะทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจน แบบที่เรียกกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนจะเติบโตและจะผลิตก๊าซมีเทน และ  $H_2S$  ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อกุ้งและปลาในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Boyd, 1998)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ผลกระทบ
0.3-1	สามารถตายได้ ถ้าสัมผัสเป็นเวลานาน
1-5	สามารถดำรงชีวิตได้ แต่มีการเจริญเติบโตช้า
สูงกว่า 5	เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

#### 2.2.6 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นสัตว์เลือดเย็น เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้อุณหภูมิในร่างกายของสัตว์น้ำเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกาย โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ เช่น จะทำให้ระบบควบคุมการขับถ่ายน้ำและแร่ธาตุภายในผิดปกติ ทำให้อุณหภูมิร่างกายอ่อนแอและตายได้ นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่นๆ ของน้ำด้วย เช่น เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะลดลง และสภาวะอุณหภูมิสูงจะเร่งให้มีการดูดซึมของสารพิษที่ละลายในน้ำเข้าสู่ร่างกายของสัตว์น้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งทะเลมีค่าอยู่ในช่วง 27-30 °C (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกุล, 2547)

#### 2.2.7 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

เนื่องจากในสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจนแบบที่เรียกขานชนิดจะสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปแบบของซัลเฟต และสารประกอบซัลเฟอร์ตัวอื่นๆ ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ได้ โดยการเปลี่ยนสารประกอบเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของซัลไฟด์ คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ),  $HS^-$  และ  $HS^{2-}$  หรือ  $S^{2-}$  ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งน้ำที่มีค่าพีเอชต่ำจะมีโอกาสในการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) สูง ส่วนน้ำที่มีค่าพี

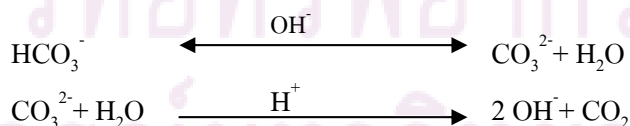
เอชสูงจะมีโอกาสเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่าและความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะลดลง โดยที่ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะคล้ายกับการขาดออกซิเจนแต่จะมีความรุนแรงกว่า (ชโล ลิมสุวรรณ, 2535) ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเข้าไปขัดขวางการขนส่งออกซิเจนภายในเซลล์จึงทำให้ปริมาณแลกเตท (Lactate) ในเลือดสูงขึ้น ดังนั้นการลดความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าพีเอชของน้ำให้สูงขึ้น ซึ่งระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อกุ้งทะเลมีค่าเท่ากับ 0.033 พีพีเอ็ม (ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์ชกุล, 2547)

### 2.2.8 ความเค็ม (Salinity)

ความเค็ม หมายถึง ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของไอออนที่ละลายในน้ำ มีหน่วยเป็นส่วนในพันส่วน (Parts per thousand: PPT หรือ Practical Salinity Unit: PSU) ซึ่งความเค็มของน้ำในแหล่งน้ำจืดส่วนมากจะมีค่าระหว่าง 0.05-1 พีเอสยู ส่วนความเค็มของน้ำทะเลปกติจะมีค่าระหว่าง 30-35 พีเอสยู แร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักของความเค็มในน้ำมี 7 ชนิด คือ โซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ ซัลเฟต และไบคาร์บอเนต ซึ่งกุ้งทะเลสามารถอาศัยอยู่ในน้ำที่มีความเค็มในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 0-45 พีเอสยู แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงของความเค็มอย่างช้าๆ ซึ่งความเค็มที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำมากที่สุดมีค่าอยู่ในช่วง 15-20 พีเอสยู และความเค็มที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งพ่อแม่พันธุ์กุ้งขาวมีค่าอยู่ในช่วง 28-36 พีเอสยู (ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์ชกุล, 2547)

### 2.2.9 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างของน้ำ หมายถึง ความสามารถของน้ำที่จะรับไฮโดรเจนไอออนเพื่อให้เกิดกรดเป็นกลาง โดยที่สารประกอบที่ทำให้เกิดความเป็นด่างมี 3 ชนิด คือ ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) คาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งความเป็นด่างในน้ำสามารถที่จะป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้โดยกระบวนการบัฟเฟอร์ (Buffer System) ดังสมการ



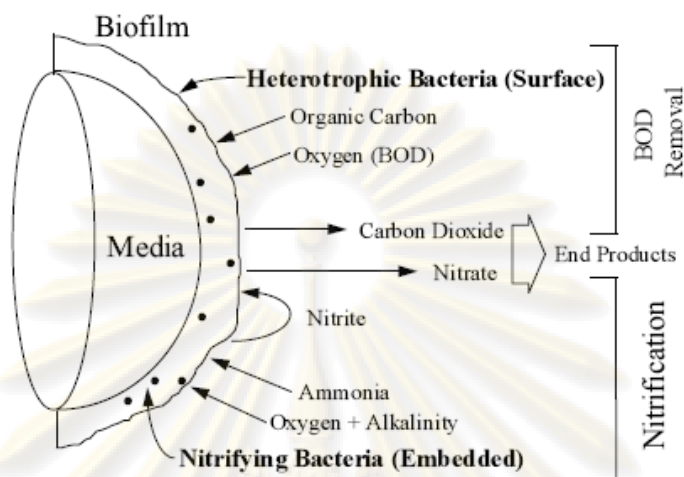
ดังนั้นความเป็นด่างจึงมีความจำเป็นสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด เพื่อประโยชน์ในการรักษาสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ซึ่งจากรายงานของ Tookwinas (2000) เสนอว่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งควรมีค่าสูงกว่า 80 มก./ล. และความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O'sullivan, 1993)

## 2.3 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

ระบบกรองทางชีวภาพ (Biological filters) เป็นกระบวนการสำคัญในการบำบัดคุณภาพน้ำของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยชนิดของระบบกรองทางชีวภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นมีการประยุกต์ใช้ตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) หลายประเภท เช่น ตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำ (Submerged filters) แบบโปรยกรอง (Trickling filters) แบบตัวกรองหมุน (Rotating media filters) และแบบฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed) เป็นต้น ตัวกรองชีวภาพเป็นวัสดุสำหรับให้แบคทีเรียในระบบยึดเกาะซึ่งเรียกว่า การตรึง (Immobilization) โดยการยึดเกาะจะเกิดเป็นชั้นเรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ซึ่งสามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกรองชีวภาพได้ (Leonard และคณะ, 2000) เมื่อแบคทีเรียในระบบมายึดเกาะและเติบโตเพิ่มจำนวนบนตัวกรอง จะมีผลทำให้การเกาะของแบคทีเรียบนผิวของตัวกรองเป็นชั้นหนาขึ้นเรื่อยๆ โดยในระยะเริ่มแรกจะเป็นเพียงชั้นเซลล์บางๆ ซึ่งอยู่ในสภาพมีออกซิเจน (Aerobic layer) แต่เมื่อเซลล์เพิ่มจำนวนเป็นชั้นหนาขึ้นจะเกิดสภาพไร้ออกซิเจนขึ้นภายใน (Anaerobic layer) ในขณะที่บริเวณผิวด้านนอกจะยังคงมีสถานะใช้ออกซิเจนอยู่ สำหรับกลไกการบำบัดน้ำเสียโดยตัวกรองชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์แขวนลอยจะถูกย่อยสลายจนได้โมเลกุลเล็กๆบริเวณผิวฟิล์มแบคทีเรีย จากนั้นน้ำเสียจะไหลผ่านชั้นฟิล์มแบคทีเรียด้วยวิธีการแพร่ระดับโมเลกุล (Molecular diffusion) แล้วถูกแบคทีเรียเปลี่ยนรูปหรือย่อยสลายต่อไป

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียเป็นฟิล์มชีวภาพซึ่งอยู่ที่ผิวของตัวกรองจะเกิดขึ้นจากการยึดเกาะของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม แบคทีเรียกลุ่มแรกคือ เฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ซึ่งใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งของคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยจะใช้ ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ใช้จะอยู่ในรูปของค่าบีโอดี แบคทีเรียกลุ่มที่สองคือ ออโตโทรฟ (Autotroph) ซึ่งใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งของพลังงานและไนโตรเจนที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการสร้างเซลล์ ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นบนตัวกรองชีวภาพ แอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์โดยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย และไนไตรต์จะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรตโดยแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย ซึ่งสารประกอบไนเตรตที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ สำหรับการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะมีแข่งขันกันในการเจริญเติบโต โดยมีปัจจัยต่างๆในการเจริญเติบโตที่จำกัด ไม่ว่าจะเป็นปริมาณสารอาหารออกซิเจน และพื้นที่บนผิวของตัวกรอง ซึ่งตามปกติแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะเจริญเติบโตได้เร็วกว่าออโตโทรฟ เนื่องจากมีความสามารถในการใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน ได้ดีกว่า ทำให้เฮเทอโรโทรฟสามารถเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตได้ ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะอาศัยอยู่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของแผ่นฟิล์มชีวภาพเนื่องจากมีปัจจัยที่เหมาะสมทั้งปริมาณออกซิเจน

และสารอาหาร ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มออกโตโทรฟซึ่งเจริญเติบโตได้ช้ากว่าจะอาศัยอยู่บริเวณด้านในของแผ่นฟิล์มชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออกโตโทรฟบนผิวตัวกรองชีวภาพ (Golz, 1995)

สำหรับการเลือกวัสดุที่จะใช้เป็นตัวกรองชีวภาพ จำเป็นต้องพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของผิวตัวกรองซึ่งมีความสำคัญต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ถ้าใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก มีความพรุนหรือรูขุมระมาก ปริมาณจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะจะมากตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาเลือกชนิดของตัวกรองชีวภาพไปใช้จะขึ้นกับลักษณะของการจัดการระบบเพาะเลี้ยง ประเภทของน้ำที่ต้องการบำบัด และอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งคุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพและพื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพจากงานวิจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ (Golz, 1995)

Biofilter Type	Processes Performed	Biofilm management	*Vol. Nitrif. Rate (mg N/ft <sup>3</sup> /day)	Operational Issues
RBC	Biofiltration	Passive	1,250	Clogging
Trickling Filter	Biofiltration	Passive	1,250	Clogging
Fluidized-Sand	Biofiltration	Active-Backwash	17,500	Flow Rate
EGB	Biofiltration & Solids Capture	Active-Backwash	8,750	Backwash Regime

\* Note : The volumetric nitrification rate based upon the specific surface area of an average-sized media.

ตารางที่ 2.4 พื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพจากงานวิจัยต่างๆ

Type	SSA (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	References
Trickling filters	100 to 1000	Crab (2007)
- Finturf artificial grass	284	Greiner และ Timmons (1998)
- Kaldnes rings	500	Lekang และ Kleppe (2000)
- Norton rings	220	Timmons และคณะ (2006)
- Leca or light weight clay aggregate	500-1000	Timmons และคณะ (2006)
Downflow microbead filters	1150-3936	Greiner และ Timmons (1998)
Fluidized sand biofilters	4000-20000	Summerfelt (2006)
R-190	190	This study
BCN 009	864	

สำหรับอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจะวัดในหน่วยของพื้นที่ผิวของตัวกรอง (Specific Surface Area; SSA) ต่อหน่วยเวลา หรือหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อปริมาตรของตัวกรอง โดยที่ตัวกรองต่างชนิดกันจะมีค่าอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันที่แตกต่างกันด้วย จากการทบทวนงานวิจัยต่างๆ พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพมีค่าในช่วง 0.1-1.1 g TAN/m<sup>2</sup>.day ซึ่งอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ

Type	Ammonia removal rate	Unit	Reference
Rotating Biological Contactor	0.42	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Brazil (2006)
Rotating Biological Contactor	175	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Timmon และ Losordo, (1994)
Rotating Biological Contactor	0.19–0.79	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Miller และ Libey (1985)
Trickling Filters	0.16	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Eding และคณะ (2006)
Trickling Filters	0.64	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Lyssenko และ Wheaton (2006)
Trickling Filters	1.1	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Schnel และคณะ (2002)
Trickling Filters	0.24-0.55	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Kamstra และคณะ(1998)
Trickling Filters	0.75	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Timmon และ Losordo, (1994)
Downflow Microbead Filters	0.30	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Timmons และคณะ (2006)
Downflow Microbead Filters	0.45–0.60	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Greiner และ Timmons (1998)
Fluidized Beds	0.25-0.35	gTAN/m <sup>2</sup> .day	Timmon และ Losordo, (1994)
Fluidized Sand Biofilters	0.24	gN/m <sup>2</sup> .day	Miller และ Libey (1985)
Bead Filters	0.1-0.25	gN/m <sup>2</sup> .day	Timmon และ Losordo, (1994)

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ

ตัวกรองชีวภาพนำมาใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการบำบัดคุณภาพน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการทำงานของตัวกรองชีวภาพนั้นวัดได้จากความสามารถในการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรด โดยที่ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.4.1 ความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH)

ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 6-9 (Timmon และ Losordo, 1994) ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างแคบ เนื่องจากไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่างได้อย่างช้าๆ โดยอัตราการปรับตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และปัจจัยอื่นๆ ในตริไฟอิงแบคทีเรียประกอบด้วย 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ *Nitrobacter spp.* และ *Nitrosomonas spp.* ซึ่งความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเติบโตของ *Nitrosomonas spp.* มีค่าอยู่ในช่วง 7.2-8.8 และความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเติบโตของ *Nitrobacter spp.* มีค่าอยู่ในช่วง 7.2-9.0 (Chen และคณะ, 2006)

#### 2.4.2 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างมีความสำคัญต่อการเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เนื่องจากคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนตมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะนำมาใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนในการสร้างเซลล์เพื่อการเติบโต โดยที่ไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการความเป็นด่างของน้ำ 7.14 กรัม as CaCO<sub>3</sub> ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรต (Tchobanoglous และคณะ, 2004) ดังสมการ



และกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกิดกรด (Acid-forming process) เมื่อตัวกรองชีวภาพทำงานจะมีการผลิตไฮโดรเจนไอออนอิสระส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำต่ำลง ดังนั้นจึงต้องเติมบัฟเฟอร์โดยการปรับค่าความเป็นด่างเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำ โดยทั่วไปนิยมนำโซเดียมไบคาร์บอนเนตมาใช้ปรับความเป็นด่างในน้ำ เนื่องจากละลายน้ำได้ง่าย มีคุณภาพสูงและราคาไม่แพง (Timmon และ Losordo, 1994) ซึ่งความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O'sullivan, 1993)

#### 2.4.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

บนผิวของตัวกรองชีวภาพจะมีชั้นฟิล์มชีวภาพที่ประกอบด้วย ชั้น Stagnant layer และชั้น Slime layer โดยที่ออกซิเจนสามารถที่จะแพร่กระจายผ่านชั้น Stagnant layer ที่มีลักษณะเป็นชั้นน้ำบางๆ ผ่านมาสู่ชั้น Slime layer ที่ล้อมรอบเซลล์ของไนตริไฟอิงแบคทีเรียอยู่ จากนั้นออกซิเจนจะแพร่เข้าสู่เซลล์เมมเบรนของแบคทีเรีย ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการออกซิเจน 4.57 กรัม ออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรต (Tchobanoglous และคณะ, 2004) ดังนั้นถ้าในน้ำมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอจะส่งผลต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันทำให้มีอัตราไนตริฟิเคชันต่ำลง ซึ่งปริมาณออกซิเจนบนตัวกรองชีวภาพควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2 มก./ล. (Lawson, 1995) และในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5-6 มก./ล. (Timmon และ Losordo, 1994)

#### 2.4.4 แอมโมเนียและไนไตรต์ (Ammonia and Nitrite)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์สามารถเป็นพิษต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรียได้ ซึ่งความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10-150 มก.ไนโตรเจน/ล. จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas spp.* และจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter spp.* เมื่อมีความเข้มข้น 0.1-1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนกรดไนตริกจะยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 0.22-218 มก.ไนโตรเจน/ล. (Anthonised และคณะ, 1976) และ U.S. EPA (1993) ได้ระบุไว้

ว่าแอมโมเนียและกรดไนตริกสามารถยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน อุณหภูมิ และพีเอช โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเท่ากับ 7 พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 และ 20 มก.ในโตรเจน/ล. จะยับยั้งกระบวนการออกซิเดชันของแอมโมเนียและไนไตรต์ ตามลำดับ และความเข้มข้นของแอมโมเนีย 280 มก.ในโตรเจน/ล. จะยับยั้งกระบวนการไนไตรต์ออกซิเดชัน

#### 2.4.5 ตะกอนแขวนลอย (Suspended solid)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจะมีตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นจากเศษอาหารและของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ ตะกอนแขวนลอยมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ โดยที่จะไปอุดตันผิวของตัวกรองชีวภาพทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจนเป็นผลให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่สามารถเติบโตได้ และตะกอนแขวนลอยที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะสามารถนำมาใช้ในการเติบโตได้ และเพิ่มปริมาณมากขึ้นก็อาจจะไปแย่งพื้นที่ว่างบนผิวของตัวกรองชีวภาพทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่สามารถเติบโตได้ (Timmon และ Losordo, 1994)

#### 2.4.6 ความเค็ม (Salinity)

ตัวกรองไนตริฟิเคชันสามารถทำงานได้ในช่วงความเค็มที่กว้างตั้งแต่ น้ำจืดจนถึงน้ำเค็ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-40 พีเอสยู แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มอย่างช้าๆ จากรายงานของ Hochheimer (1990) กล่าวว่า การที่เปลี่ยนความเค็มอย่างรวดเร็วจะทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียหยุดการทำงานอย่างกะทันหันและทำให้อัตราไนตริฟิเคชันมีค่าลดลง และถ้าความเค็มมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 5 ส่วนในพันส่วนอย่างฉับพลันจะทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียลดอัตราการกำจัดแอมโมเนียและไนไตรต์ (Lawson, 1995)

#### 2.4.7 แร่ธาตุ โลหะหนักและสารเคมีบางชนิด (Mineral, Metal and Chemical)

แร่ธาตุบางชนิดจำเป็นต่อการเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เช่น แคลเซียมทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของ *Nitrosomonas spp.* มีประสิทธิภาพดีขึ้น แมกนีเซียมมีความจำเป็นต่อการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter spp.* เป็นต้น แต่โลหะหนักบางชนิดก็สามารถไปยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิงแบคทีเรียได้ เช่น โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว คอปเปอร์ เป็นต้น (Timmon และ Losordo, 1994) จากการศึกษาของ Skinner และ Walker (1961) รายงานว่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่ยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันในขั้นตอนแอมโมเนียออกซิเดชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของนิกเกิล 0.25 มก./ล. ความเข้มข้นของโครเมียม 0.25 มก./ล. และความเข้มข้นของคอปเปอร์ 0.1 มก./ล. ซึ่งนอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์บางชนิดสามารถที่จะยับยั้งกระบวนการ



ไนตริไฟเคชันได้ เช่น Solvent, เอมีน, โปรตีน, เทนินิน, สารประกอบฟีนอลิก, แอลกอฮอล์, ไซยาเนต, คาร์บาเมต, เบนซีน เป็นต้น (Hockenbury และ Grady, 1977)

#### 2.4.8 อุณหภูมิ (Temperature)

ไนตริไฟเคชันแบบที่เรียที่อาศัยอยู่บนตัวกรองชีวภาพสามารถอาศัยอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ซึ่งจะปรับตัวอย่างช้าๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการศึกษาของ Hagopian และ Riley (1998) พบว่าอุณหภูมิในช่วง 7-35 องศาเซลเซียส อัตราการบำบัดแอมโมเนียและอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์กันเป็นสมการเส้นตรง

#### 2.4.9 ชนิดและขนาดของตัวกรอง (Filter media)

การเลือกวัสดุกรองมีความสำคัญต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย วัสดุที่นำมาใช้ในระบบกรองชีวภาพในปัจจุบันมีมากมายหลายรูปแบบ สิ่งสำคัญในการเลือกวัสดุกรองคือวัสดุที่จะนำมาใช้ทำตัวกรองต้องไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และต้องคำนึงถึงน้ำหนัก พื้นที่ผิว และอายุการใช้งาน นอกจากนี้การเลือกวัสดุยังขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกรอง และสภาพการใช้งานด้วย

วัสดุกรองที่ใช้ในปัจจุบันมีสองชนิดคือวัสดุกรองธรรมชาติและวัสดุกรองสังเคราะห์ วัสดุกรองธรรมชาติ เช่น ทราย หิน เปลือกหอย มักมีราคาถูกแต่จะมีปัญหาเรื่องน้ำหนักที่มากหรือมีปัญหาเนื่องจากการอุดตันของตัวกรองเพราะช่องว่างระหว่างตัวกรองมีน้อย ส่วนวัสดุกรองที่ทำจากพลาสติกและเซรามิกจะมีความคงทนกว่ามีปัญหาการอุดตันน้อย แต่วัสดุกรองพวกนี้จะมีราคาแพงและไม่สามารถในการเพิ่มขีดความสามารถบัพเฟอร์เหมือนในวัสดุกรองธรรมชาติพวกเปลือกหอย หินหรือปะการัง

#### 2.4.10 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรอง (Specific surface area)

พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรองคือผลรวมของพื้นที่ทั้งหมดของตัวกรองชีวภาพที่แบคทีเรียสามารถมายึดเกาะได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ขนาดของตัวกรอง อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร โดยส่วนใหญ่ตัวกรองชีวภาพขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวของตัวกรองมาก ซึ่งจะทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถมายึดเกาะและเติบโตเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้น แต่ถ้าในระบบใช้ตัวกรองชีวภาพขนาดใหญ่จะทำให้ต้องสร้างระบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

## 2.5 ชนิดของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงรูประหว่างสารประกอบหลากหลายรูปแบบ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตและปัจจัยสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำมีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่

### 2.5.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compounds)

สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนคือ สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์พืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังรวมถึงสิ่งขับถ่ายจากสัตว์และสารจากการย่อยสลายสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โปรตีน คอลโรฟิลล์ กรดอะมิโน กรดยูริก และยูเรีย เป็นต้น

### 2.5.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds)

สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนคือ ไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในรูปแอมโมเนีย หรือสารประกอบแอมโมเนียซึ่งส่วนใหญ่จะพบในรูปแบบแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ที่เกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ซึ่งเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์

### 2.5.3 สารประกอบไนไตรต์ (Nitrite-nitrogen compounds)

สารประกอบไนไตรต์คือ สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันที่ยังไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินและน้ำ

### 2.5.4 สารประกอบไนเตรต (Nitrate-nitrogen compounds)

สารประกอบไนเตรตคือ สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่นในกระบวนการไนตริฟิเคชัน และหากสภาวะแวดล้อมมีออกซิเจนในปริมาณมากเกินพอแล้ว สารประกอบไนเตรตนี้จัดได้ว่าเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรมากที่สุด นอกจากนี้ยังเป็นธาตุอาหารที่สำคัญของพืชน้ำและสาหร่าย

## 2.6 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

การบำบัดสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในน้ำทิ้งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งอาศัยการทำงานของแบคทีเรีย เชื้อรา และแบคทีเรียเส้นใยบางกลุ่ม โดยจะเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนไปอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือ แอมโมเนียมไอออน ซึ่งเป็นแอมโมเนียอิสระที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมาก หากในน้ำมีปริมาณแอมโมเนียสูงเกินไป สัตว์น้ำจะไม่สามารถขับถ่ายแอมโมเนียออกจากกระแสเลือดได้ ทำให้เป็นอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยกลุ่มแบคทีเรียไนตริไฟอิงจะออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์และไนเตรต ตามลำดับ ในสถานะที่มีการเติมออกซิเจนจากนั้นจะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันต่อโดยการทำงานของดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียซึ่งไนเตรตที่เกิดขึ้นจะถูกลดรูปให้เป็นก๊าซไนโตรเจน ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือแอนอกซิกซึ่งถือว่าเป็นการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนอย่างสมบูรณ์แบบ โดยรายละเอียดสำหรับแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้น แสดงในหัวข้อ 2.6.1 ถึง 2.6.3

### 2.6.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน

เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนไปอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ มีชื่อเรียกว่าการแปลงเป็นแร่ธาตุไนโตรเจนหรือไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen mineralization) โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ซึ่งสามารถพบได้ในชั้นน้ำและดินตะกอนก้นบ่อ กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสถานะที่มีออกซิเจนและสถานะไร้ออกซิเจน แต่เนื่องจากสารอินทรีย์และแบคทีเรียมักพบได้มากในดินตะกอน การผลิตแอมโมเนียส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่ผิวชั้นดินตะกอนใต้น้ำซึ่งเป็นบริเวณที่มีสารอินทรีย์มากที่สุด ส่วนแอมโมเนียที่เกิดในชั้นน้ำจะถูกพืชน้ำดูดซึมไปใช้เป็นอาหาร และบางส่วนจะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นไนเตรตด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยการใช้แอมโมเนียทั้งสองแบบจะเกิดขึ้นได้ในน้ำที่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงพบว่าแอมโมเนียจะมีปริมาณน้อยในน้ำที่มีออกซิเจนแต่จะสะสมตัวมากในสถานะที่ไร้ออกซิเจน

สำหรับกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการให้อาหารกับกุ้ง โดยกุ้งที่เลี้ยงในบ่อจะต้องได้รับออกซิเจนที่พอเพียงซึ่งในน้ำควรมีปริมาณออกซิเจนมากกว่า 4 มก./ล. (ชโล ลิมสุวรรณ, 2535) เพื่อให้กุ้งสามารถสร้างพลังงานสำหรับการดำรงชีวิตและทำให้มีการเจริญเติบโตที่ดี ซึ่งผลจากการเผาผลาญโปรตีนจะมีผลทำให้เกิดแอมโมเนียซึ่งจะเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต ดังนั้นกุ้งจึงต้องกำจัดแอมโมเนียออกมานอกร่างกาย

### 2.6.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน

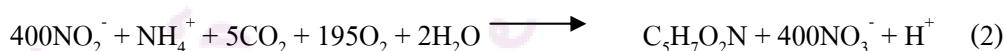
เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำให้เป็นไนเตรต โดยอาศัยการทำหน้าที่ของอโอโตโทรฟ 2 กลุ่ม ใน 2 กระบวนการย่อย โดยขั้นตอนแรกคือกระบวนการไนไตรติฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งจะอาศัยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงหรือ AOB ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ ส่วนขั้นตอนที่สองคือกระบวนการไนเตรติฟิเคชัน (Nitrification) โดยแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซิงหรือ NOB ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์เป็นไนเตรต ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือสภาวะแอโรบิกและได้พลังงานออกมา โดยแบคทีเรียจะใช้พลังงานในส่วนนี้ไปดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนคาร์บอเนตเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป

1. กระบวนการไนไตรติฟิเคชันหรือแอมโมเนียมออกซิเดชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ ดังสมการที่ 1



เมื่อมีการเกิดกระบวนการไนไตรติฟิเคชันจะมีการสะสมของไฮโดรเจนไอออน ซึ่งจะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีสภาพเป็นกรด ถ้าพีเอชของน้ำมีค่าต่ำกว่า 6.0 จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ดังนั้นในถึงปฏิกิริยาที่ทำการย่อยสลายด้วยกระบวนการไนไตรติฟิเคชันจะต้องปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยสารละลายไบคาร์บอเนตหรือสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างอื่นๆ

2. กระบวนการไนเตรติฟิเคชันหรือไนไตรต์ออกซิเดชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต ดังสมการที่ 2



ไนเตรตที่เกิดจากกระบวนการนี้ ถ้าหากถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้พืชน้ำและสาหร่ายดูดซึมไปใช้ได้ง่ายทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน แต่ในขณะเดียวกันไนเตรตบางส่วนอาจซึมลงสู่ใต้ดินทำให้เกิดการปนเปื้อนน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลได้

ไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม AOB ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ เช่น *Nitrosomonas spp.* และ *Nitrosospira spp.* และแบคทีเรียกลุ่ม NOB ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ให้เป็นไนเตรต เช่น *Nitrobacter spp.* และ *Nitrospira spp.* (Wheaton, 1977)

### 2.6.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

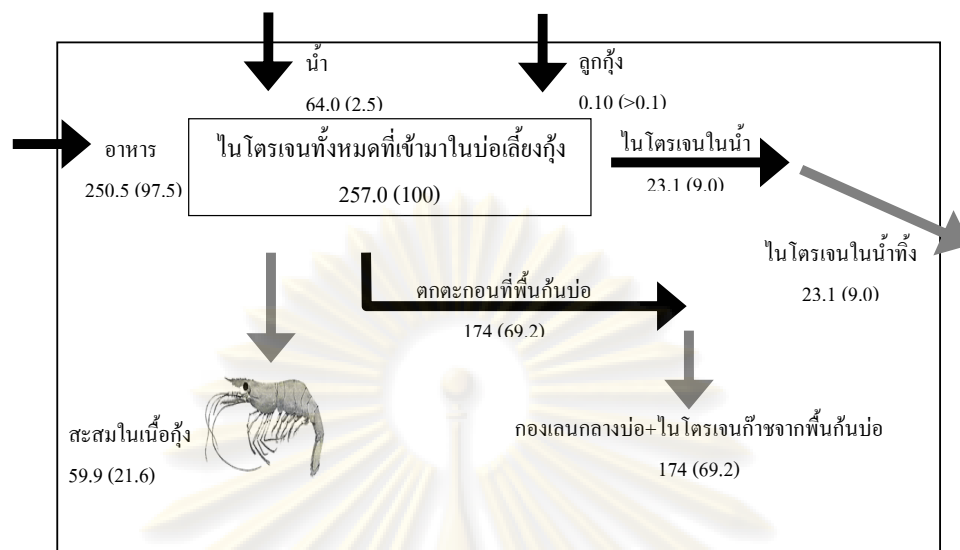
กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas or Molecular nitrogen) หรืออาจจะมีการเกิดขึ้นด้วยรวมทั้ง Nitrous ( $N_2O$ ) กระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่ไม่มีไนเตรต แต่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนหรืออาศัยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือกระบวนการอื่นๆ ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นจุลินทรีย์ที่จำเป็นต้องอาศัยไนเตรตสำหรับการดำรงชีวิตจึงเจริญได้ในสภาวะที่มีไนเตรตเท่านั้น เช่น แบคทีเรียบางชนิดในจีโนส *Pseudomonas Achromobacter, Bacillus, Micrococcus* และ *Thiobacillus denitrificans* โดยส่วนใหญ่กระบวนการดีไนตริฟิเคชันนั้น ไนเตรตจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟเออร์ซึ่งเป็นที่ตั้งออร์กาโนโทรฟ (Organotroph) ซึ่งได้รับพลังงานจากสารอินทรีย์ ลิโทโทรฟ (Lithotroph) ซึ่งได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี และโฟโตโทรฟ (Phototroph) ซึ่งได้รับพลังงานจากแสง โดยที่จุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวสามารถใช้ไนเตรต ( $NO_3$ ) ไนไตรต์ ( $NO_2$ ) ไนตริกออกไซด์ (NO) หรือซัลเฟต ( $SO_4$ ) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระในสภาวะแอนอกซิก

เนื่องจากแบคทีเรียดังกล่าวต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสู่ระบบเนื่องจากความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนในน้ำเสียไม่เพียงพอสำหรับการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน และแบคทีเรียจะต้องนำคาร์บอนนี้ไปลดรูปของไนโตรเจน คือ ไนไตรต์ ( $NO_2$ ) ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ( $N_2O$ ) จนถึงก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) สารอินทรีย์คาร์บอนที่มีการใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ เมธานอล โซเดียมอะซิเตท อาหารกุ้งหรือกากน้ำตาล เป็นต้น

## 2.7 สารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง (พุทธ ส่องแสงจินดา, 2549)

### 2.7.1 การสะสมของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด

ไนโตรเจนเกือบทั้งหมด 97% ที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้งมาจากอาหาร โดยกุ้งสามารถเก็บไนโตรเจนไว้ในเนื้อกุ้งได้ประมาณ 21.8% ส่วนไนโตรเจนที่เหลือประมาณ 80% นั้นจะตกค้างอยู่ในบ่อในรูปของเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของกุ้งที่บริเวณก้นบ่อประมาณ 70% และในรูปของสิ่งขับถ่ายที่ละลายน้ำได้ เช่น อินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตประมาณ 9% ไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในบ่อจะมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กไปอยู่ในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เป็นพิษกับกุ้ง โดยสารประกอบไนโตรเจนรูปต่างๆจะเกิดการหมุนเวียนไปมาในระบบนิเวศของบ่อเลี้ยงกุ้งซึ่งบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนและจะออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งไป ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ตัวเลขแสดงปริมาณไนโตรเจน : หน่วยกิโลกรัมไนโตรเจนต่อรุ่น (% เทียบกับไนโตรเจนทั้งหมด)

รูปที่ 2.2 ปริมาณไนโตรเจนที่เติมเข้าไปและสะสมอยู่ในส่วนต่างๆของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด (พุทธ ส่องแสงจินดา, 2549)

### 2.7.2 การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในอาหารกุ้ง

เมื่อมีการให้อาหารกุ้งในปริมาณที่มากเกินไปจนเป็นผลให้มีอาหารเหลือตกค้างอยู่ในระบบ จึงส่งผลโดยตรงทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป สารอินทรีย์ที่อยู่ในอาหารจะสามารถละลายออกมาอยู่ในน้ำได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 3-4 วัน สารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายและปล่อยแอมโมเนียออกมาอยู่ในน้ำโดยถ้าอาหารเหลือเพียงครั้งเดียวจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาแอมโมเนียได้ประมาณ 1 เดือน และหลังจากแอมโมเนียเพิ่มปริมาณมากขึ้นไนไตรต์จะเกิดขึ้นตามมา

### 2.7.3 กระบวนการไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้ง

กระบวนการไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจะอาศัยแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟิอิงแบคทีเรีย เช่น *Nitrosomonas spp.* และ *Nitrobacter spp.* ในการใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจะเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรต ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะไม่สามารถใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียว ในการเจริญเติบโตแบคทีเรียจำเป็นต้องมีแหล่งของความเป็นค่าด้วย ซึ่งในบ่อเลี้ยงกุ้งจะต้องทำการเติมลงไปในรูปแบบของปูนคาร์บอนเนตหรือปูนโดโลไมท์เพื่อให้แบคทีเรียมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ขณะเดียวกันแบคทีเรียกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนเพื่อการเผาผลาญอาหารและการสร้างพลังงาน ถ้าในบ่อเลี้ยงกุ้งเกิดสภาวะขาดออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ จะเป็นสาเหตุให้กระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตไม่สมบูรณ์

ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนกับออกซิเจนและไบคาร์บอเนตของกระบวนการไนตริ-ฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจะทำให้ปริมาณแอมโมเนียลดลง การใช้ออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ไนโตรเจนในบ่อมีปริมาณออกซิเจนน้อยลง และเนื่องจากการนำไบคาร์บอเนตไปใช้และคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาทำให้น้ำมีค่าพีเอชต่ำลง ในกรณีที่มือออกซิเจนหรือปริมาณแบคทีเรียไม่เพียงพอจะทำให้การเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียไปเป็นไนเตรตเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสะสมของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง

#### 2.7.4 ผลของแอมโมเนียต่อกุ้งทะเล

แอมโมเนียที่พบในน้ำจะอยู่ในสองรูปแบบคือ แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แอมโมเนียทั้งสองรูปแบบนี้จะสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ เมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นอัตราส่วนของแอมโมเนียจะสูงขึ้นทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากขึ้น แต่ถ้าพีเอชของน้ำลดลงแอมโมเนียในรูปแอมโมเนียมไอออนจะมีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลง สำหรับการขับถ่ายของเสียของกุ้งนั้นกุ้งจะขับออกมาในรูปแอมโมเนีย โดยเลือดกุ้งจะเป็นตัวกลางในการปล่อยแอมโมเนียออกมาภายนอก ร่างกายทางเหงือกกุ้งในระหว่างที่กุ้งมีการหายใจ น้ำที่มีแอมโมเนียน้อยซึ่งจะมีแอมโมเนียอิสระในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อกุ้งเท่ากับ 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบที่จะทำให้กุ้งสามารถขับถ่ายแอมโมเนียได้ดีและมีการเจริญเติบโตที่ดี แต่เมื่อแอมโมเนียในน้ำมีปริมาณสูงขึ้นจะมีผลต่อการขับถ่ายแอมโมเนียของกุ้งทำให้กุ้งสามารถขับถ่ายแอมโมเนียได้น้อยลงจึงเกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ ส่งผลให้พีเอชของเลือดเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยแอมโมเนียจะทำให้การใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อสูงขึ้นซึ่งแอมโมเนียจะไปทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจนทำให้กุ้งอ่อนแอติดโรคได้ง่าย ซึ่งระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้สัตว์น้ำตายโดยปกติอยู่ในช่วง 0.4-2.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ในรูปของแอมโมเนีย แต่ถ้าแอมโมเนียมีความเข้มข้นสูงมากจะทำให้กุ้งเครียดจนอาจจะทำให้กุ้งตายได้เมื่อมีระดับแอมโมเนียอิสระมากกว่า 0.4 มก.ไนโตรเจน/ล. (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัฐกุล, 2547)

กุ้งมีการตอบสนองต่อแอมโมเนียในระดับต่างกัน แอมโมเนียที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กุ้งต้องการออกซิเจนมากขึ้นซึ่งหมายถึงว่ากุ้งจะมีการหายใจมากขึ้น ในทางตรงข้ามกุ้งจะสามารถหมุนเวียนเลือดนำแอมโมเนียมาขับออกที่เหงือกซึ่งจะทำให้กุ้งเสียพลังงานมาก ในสถานะที่น้ำมีปริมาณแอมโมเนียสูงและออกซิเจนละลายต่ำกุ้งจะลดการหายใจซึ่งจะเป็นกลไกที่ป้องกันไม่ให้แอมโมเนียในน้ำเข้าสู่ร่างกายของกุ้ง แต่จะทำให้กุ้งมีความเครียดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้กุ้งเจริญเติบโตช้าลง เนื่องจากกุ้งหายใจน้อยและลดกิจกรรมในการดำรงชีวิตซึ่งจะหมายถึงการลดอัตราการกินอาหารด้วย ในสถานะที่น้ำมีพีเอชสูงขึ้นถึงแม้ว่าในน้ำจะมีปริมาณแอมโมเนียรวมเท่า

เดิมแต่สัดส่วนของแอมโมเนียอิสระที่เป็นพิษต่อการเลี้ยงกุ้งจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น (ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกุล, 2547)

ตารางที่ 2.6 ปริมาณแอมโมเนียอิสระและผลกระทบต่อกุ้งทะเล (ชโล ลิมสุวรรณ, 2535)

แอมโมเนียอิสระ (มก. ในโตรเจน/ล.)	ผลต่อกุ้งทะเล
น้อยกว่า 0.1	ปลอดภัยต่อการเลี้ยงกุ้ง
0.1 - 0.4	กุ้งโตช้า
มากกว่า 0.4	กุ้งโตช้า กินอาหารน้อยลงเครียดหรือตาย

### 2.7.5 ผลของไนไตรต์ต่อกุ้งทะเล

การสะสมของของเสียจากการขับถ่ายของกุ้งและเศษอาหารเหลือเป็นแหล่งของสารประกอบไนโตรเจนที่ทำให้เกิดไนไตรต์ขึ้นภายในบ่อกุ้ง กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่มีเม็ดเลือดสีน้ำเงินซึ่งเม็ดเลือดของกุ้งเรียกว่า ฮีโมไซยานิน (Hemocyanin) ไนไตรต์มีคุณสมบัติในการจับกับเม็ดเลือดของกุ้งได้เร็วกว่าออกซิเจนทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกุ้งลดลงจึงทำให้กุ้งใช้ออกซิเจนที่ละลายน้ำได้น้อยลง ซึ่งกุ้งมีความต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในกระบวนการเผาผลาญอาหารเพื่อการดำรงชีวิตจึงทำให้การเจริญเติบโตของกุ้งลดลง ไนไตรต์ในเลือดกุ้งจะทำให้ระดับโปรตีนและพีเอชของเลือดกุ้งลดลงด้วยซึ่งจะทำให้ชีวเคมีในเลือดกุ้งเปลี่ยนแปลงไปเกิดการสะสมของยูเรียในเลือดกุ้ง และมีการดูดซึมน้ำมากทำให้สมดุลเกลือแร่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ไนไตรต์ยังส่งผลทำให้น้ำนั้นไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง พิษของไนไตรต์เป็นอันตรายต่อเหงือกทำให้กุ้งเกิดความระคายเคืองบริเวณซี่เหงือกและเป็นสาเหตุทำให้กุ้งเกิดการติดเชื้อได้ง่าย ไนไตรต์ทำให้ระบบการหายใจของกุ้งผิดปกติ กุ้งต้องหายใจถี่ขึ้นทำให้กุ้งสูญเสียระบบการขับถ่ายน้ำ และเกลือแร่จากร่างกายส่งผลให้ร่างกายอ่อนแอ ไนไตรต์มีผลทำให้กุ้งชะงักการสร้างเปลือก ไม่สามารถลอกคราบได้ กุ้งเปลือกนิ่ม การเจริญเติบโตช้าลง กุ้งอ่อนแอ และตายในที่สุด แต่ไนไตรต์จะมีความเป็นพิษต่อกุ้งน้อยกว่าแอมโมเนียเนื่องจากไนไตรต์จะสามารถจับกับเม็ดเลือดได้น้อยกว่าแอมโมเนีย น้ำที่มีระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ในช่วง 0.5-1.0 มก. ในโตรเจน/ล. จะทำให้กุ้งกินอาหารน้อยลง และถ้าไนไตรต์สูงกว่า 1.0 มก. ในโตรเจน/ล. จะไม่เหมาะสมต่อการนำมาเลี้ยงกุ้ง (ชโล ลิมสุวรรณ, 2535)

ไนไตรต์จะเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่พบในปริมาณน้อยในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยในการเลี้ยงกุ้งทะเลระบบเปิดจะพบไนไตรต์เพียงในระดับ 0.01-0.18 มก. ในโตรเจน/ล. (ชโล ลิมสุวรรณ, 2535) ซึ่งแตกต่างจากการเลี้ยงกุ้งในระบบปิดซึ่งจะมีการสะสมตัวของไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากการที่ออกซิเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งอยู่ในระดับต่ำ แบคทีเรียทำงานไม่เต็มที่ส่งผลให้ปริมาณการผลิตของไนไตรต์จากของเสียก้นบ่อมีมากเกินไป ดังนั้นถ้าสามารถจัดการให้มีออกซิเจนและ



แบคทีเรียเพียงพอลและมีของเสียที่กักบ่อน้อยจะสามารถแก้ปัญหาการสะสมของไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งได้ นอกจากนี้ระดับความเป็นพิษของไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำและค่าพีเอชของน้ำลดลง ซึ่งความเป็นพิษของไนโตรเจนสามารถถูกยับยั้งได้โดยคลอไรด์ในน้ำ ดังนั้นในน้ำทะเลซึ่งมีคลอไรด์สูงความเป็นพิษของไนโตรเจนต่อกุ้งจึงค่อนข้างต่ำ

## 2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลี้ยงกุ้ง

พุทธ ส่องแสงจินดา และคณะ (2544) ศึกษาฟลักซ์ของสารประกอบไนโตรเจนที่ผิวสัมผัสของน้ำและตะกอนดิน จากการปลดปล่อยแอมโมเนียและไนโตรเจนออกจากผิวตะกอนดินเกือบตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง ผลการทดลองพบว่าในบ่อเลี้ยงกุ้งช่วงเริ่มต้นการเลี้ยงจะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในตะกอนดินมากกว่ากระบวนการแอมโมนิฟิเคชันเล็กน้อย ต่อมากระบวนการไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะภายหลังจากการเลี้ยงกุ้งไปแล้วเป็นระยะเวลา 1-2 เดือน เนื่องจากพบการลดลงของปริมาณแอมโมเนียและมีไนเตรตสะสมในตะกอนมากขึ้น และหลังจากเลี้ยงกุ้งไปแล้วประมาณ 3 เดือน ฟลักซ์ของอนินทรีย์ไนโตรเจนจะลดลงเนื่องจากดินตะกอนกักบ่อเลี้ยงอยู่ในสภาพที่ขาดออกซิเจนอย่างมากจนทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในบ่อและดูดซับไม่ปล่อยไนเตรตออกไปจากตะกอนดิน

สุชาสินี อ่วมจันทร์ (2546) ศึกษาองค์ประกอบชนิดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชัน (NR และ DNR) สำหรับใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งดำเนินการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์สองถังที่เหมือนกัน โดยจัดให้ถัง NR มีการพ่นอากาศอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ส่วนถัง DNR ควบคุมให้ภายในถังมีสภาวะไร้ออกซิเจนซึ่งจะเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบในทั้งสองถังปฏิกรณ์ได้แก่ *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides* (CFB) group bacterium กลุ่มเด่นที่พบในถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันได้แก่ *Alpha-proteobacterium* (CFB) group bacterium และ *Methylobacterium spp.* ส่วนแบคทีเรียชนิดเด่นในถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันได้แก่ *Bacteroidetes bacterium* (CFB) group bacterium, *Pseudomonas spp.* หรือ *Uncultured Colwellia spp.* และ *Desulfobulbus spp.*

## 2. การบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงกุ้ง

Shan และ Obbard (2001) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยใช้เทคนิคการตรึงแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิง (Immobilized nitrifying bacteria) เปรียบเทียบกับวิธีการเพาะเลี้ยง (Culture nitrifying bacteria) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะทดลองกับระบบเลี้ยงกุ้งซึ่งใช้น้ำในการเลี้ยงกุ้งที่สังเคราะห์ขึ้น ส่วนที่สองจะทดลองกับระบบเลี้ยงกุ้งซึ่งใช้น้ำในการเลี้ยงกุ้งตามแบบฟาร์มเลี้ยงกุ้งจริง ผลการทดลองพบว่าการใช้เทคนิคการตรึงแบคทีเรียช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (Total ammonia nitrogen; TAN) ได้สูงถึง 70-90 % จากเดิมที่ระบบแบบเก่าซึ่งใช้วิธีการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด TAN ในช่วงเพียงแค่ 5-45 % ซึ่งการใช้เทคนิคการตรึงแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงบนตัวกรองที่มีพื้นที่ผิวที่สูงกับบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพดี และเหมาะสมกับการบำบัด TAN ของฟาร์มกุ้งในเขตร้อนชื้น

Shan และ Obbard (2003) ศึกษาการนำแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงที่ผ่านการตรึงหุ้มเชื้อจากบ่อเลี้ยงกุ้งและทดสอบแล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมาทดลองใช้กำจัดแอมโมเนียในน้ำจืด ซึ่งเป็นการกำจัดแอมโมเนียในสภาวะที่ต่างกันคือ มีความเค็มและไม่มีความเค็ม โดยจะทำการเติม TAN ความเข้มข้นเท่ากับ 3.2-4.2 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/วัน ผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงสามารถปรับตัวให้อยู่อาศัยในน้ำจืดได้ และสามารถกำจัด TAN ให้เหลือน้อยกว่า 0.25 มก.ในโตรเจน/ล. ซึ่งการตรึงแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงสามารถนำมาใช้กำจัด TAN ได้ทั้งน้ำเค็มและน้ำจืด

เกศริน ฑีฆายุ และ ศิริวรรณ คิประเสริฐ (2540) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งโดยใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* เพื่อลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทำการทดลองโดยใช้สาหร่ายที่มีความหนาแน่น 0 (ชุดควบคุม) 5, 10 และ 15 ก./ล. แขน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 0, 6, 12, 24, 48 และ 72 ชม. ผลการทดลองพบว่าสาหร่ายที่มีความหนาแน่น 15 ก./ล. สามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจนและไนเตรตได้มากที่สุด รองลงมาคือที่ความหนาแน่น 10 และ 5 ก./ล. ตามลำดับ ส่วนปริมาณไนโตรเจนรวมทั้งที่สะสมในสาหร่ายก่อนและหลังการดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งพบว่าสาหร่ายที่มีความหนาแน่น 5 มีค่ามากกว่า 10 และ 15 ก./ล. ตามลำดับ

รติวรรณ อ่อนรัมย์ และคณะ (2541) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากนาุ้งด้วยระบบบำบัดแบบชีววิทยาซึ่งประกอบด้วยระบบตะกอนเร่งและบ่อเลี้ยงสาหร่ายผสม การทดลองชุดที่ 1 มีระยะเวลาเก็บกักน้ำในระบบตะกอนเร่ง 6 ชม. และระยะเวลาเก็บกักน้ำในบ่อสาหร่ายผสม 24 ชม. การทดลองชุดที่ 2 มีระยะเวลาเก็บกักในระบบตะกอนเร่ง 4 ชม. และระยะเวลาเก็บ

กักน้ำในบ่อสำหรับผสมนาง 24 ชม. ผลการทดลองพบว่าระบบบำบัดมีค่าการบรรเทาสารอินทรีย์เท่ากับ 72.64 และ 108.96 ก.บีโอดี/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี 58.10% และ 49.25% สามารถลดแอมโมเนียไนโตรเจน ได้ 42.24% และ 35.69% และระบบยังสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้ 84.91% และ 73.79% ในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

### 3. การใช้ตัวกรองชีวภาพในการบำบัดของเสียในโตรเจน

Alhafedh และคณะ (2003) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ Plastic rolls, PVC pipes และ Scrub pads ในการควบคุมคุณภาพในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงปลาชนิด โดยน้ำเสียจะไหลออกจากบ่อเพาะเลี้ยงผ่านถังตกตะกอนและถังกรองทราย ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดโดยใช้ตัวกรองชีวภาพ โดยมีค่าแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 และ 0.22 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียอยู่ในช่วง 346 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน คิดเป็นประสิทธิภาพ 29.37% และอัตราการบำบัดไนไตรต์ 0.77 มก.ไนไตรต์/ลบ.ม./วัน คิดเป็นประสิทธิภาพ 27.3% จากผลการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพชนิด Plastic rolls มีประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำดีที่สุดใน สามารถกำจัดแอมโมเนียและไนไตรต์ออกจากระบบได้ 25.49% และ 26.3% คิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ 43 และ 9.6 มก./ตร.ม./วัน

Grossa และคณะ (2003) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำดินมาเป็นแหล่งของหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียเริ่มต้นสำหรับการเตรียมตัวกรองชีวภาพ โดยนำตัวอย่างดินจากแหล่งต่างๆมาบ่ม และศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพในการบำบัดคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลาในถังขนาด 7 ลิตร เป็นเวลา 14 วัน โดยชุดการทดลองประกอบด้วยชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการตรึงหัวเชื้อ และชุดทดลองติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียจากตัวอย่างดิน ผลการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากดินสามารถทำงานได้ดีเหมือนแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนตัวกรองชีวภาพในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป และมีประสิทธิภาพสูงกว่าถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการตรึงหัวเชื้อ โดยในถังควบคุมพบแอมโมเนียมีความเข้มข้นสูงถึง 18 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ถังทดลองสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียได้ต่ำกว่า 2 มก.ไนโตรเจน/ล. สำหรับอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดในถังชุดทดลองมีค่าเฉลี่ย 0.45 ก./14 วัน และ 95% ตามลำดับ

Tseng และ Wu (2004) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มีการเลี้ยงปลาไหล โดยใช้ตัวกรองชีวภาพซึ่งในการทำงานของตัวกรองเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจะต้องมีการล้างตัวกรองแบบย้อนกลับ (Backwashing) โดยจะศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ที่

เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของตัวกรอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ TAN และความเข้มข้นของของแข็ง (Suspended solids) ผลการทดลองพบว่าอัตราการกำจัด TAN ต่อพื้นที่ผิวของตัวกลางเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มต้นการทดลองและลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป การกำจัด TAN มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของตัวกรอง เช่น อัตราการกำจัด TAN อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ TAN และความเข้มข้นของแข็งที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ซึ่งความถี่ในการล้างย้อนของตัวกรองมีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบด้วย

Silapakul และคณะ (2005) ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกแบบเบตหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของแอมโมเนียและไนเตรต โดยถังปฏิกรณ์นี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนสภาวะให้อากาศและสภาวะไม่ให้อากาศ ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์นี้สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้สมบูรณ์ โดยเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันขึ้นพร้อมกันและไม่มีการสะสมของไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 60-870 มก.แอมโมเนีย/ตร.ม./วัน และมีอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 10-80 มก.ไนเตรต/ตร.ม./วัน

Michaud และคณะ (2006) ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในรูปอนุภาคต่อกลุ่มประชากรเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรียและประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันบนตัวกรองชีวภาพ โดยการควบคุมให้น้ำที่ไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ทุกถังมีความเข้มข้นของ TAN เท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. และแปรเปลี่ยนค่าสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนแตกต่างกันคือ 0, 0.5, 1 และ 2 มก./ล. ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกิจกรรมและจำนวนของเฮเทอโรโทรฟแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพ โดยสัดส่วนที่เท่ากับ 0.5 มีค่าอัตราการกำจัด TAN น้อยกว่า 30% และสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนสูงประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันจะลดลง 50% ในขณะที่จำนวนของแบคทีเรียที่อยู่บนตัวกรองชีวภาพจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น 2 เท่า

Sesuk และคณะ (2009) ศึกษาความเป็นไปได้ในการเลี้ยงปลานิลและบ่มตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไปพร้อมกัน โดยการใช้อาหารที่เหลือจากการกินและของเสียจากการขับถ่ายของปลานิลในการเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันบนตัวกรองชีวภาพชนิด Submerged fibrous ผลการศึกษาพบว่าหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 3 สัปดาห์ จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นโดยพบการสะสมของไนเตรตในขณะที่พบแอมโมเนียและไนไตรต์ในปริมาณน้อย โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 24.1 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 44 วันพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจน 1.24-10.78 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน โดยการเลี้ยงปลานิลในบ่อที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพพบว่าปลานิลมีอัตราการเติบโต 3.01-3.35 ก. ซึ่งมีอัตราการเติบโตสูงกว่าบ่อที่เลี้ยงโดยไม่มีตัวกรองชีวภาพ 7-16%

นภาพร กิตติมศักดิ์ (2541) ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวกรองชีวภาพแบบไบโอครัมและแบบได้น้ำซึ่งใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิด เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับการทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำและปลากะพงขาว ระบบบ่อทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนคือ บ่อเลี้ยงและบ่อบำบัดซึ่งมีตัวกรองชีวภาพต่างชนิดกัน คือ ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอครัมและตัวกรองชีวภาพแบบได้น้ำ ผลการทดลองพบว่าระบบตัวกรองชีวภาพทั้งสองแบบสามารถควบคุมคุณภาพน้ำคือ แอมโมเนียรวม ไนโตรต์และไนเตรตให้อยู่ในเกณฑ์ปกติ อัตราออกของกุ้งกุลาดำมีค่าเท่ากับ 6.25% และ 7.03% และมีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.056 ก./วัน และ 0.051 ก./วัน ในชุดการทดลองแบบไบโอครัมและได้น้ำตามลำดับ ส่วนการทดลองเลี้ยงปลากะพงขาวพบว่าปริมาณแอมโมเนียรวม และไนโตรต์ในชุดการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบได้น้ำจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบไบโอครัม ซึ่งอัตราออกของปลากะพงขาวเท่ากับ 58.42% และ 57.00% อัตราการเติบโตเท่ากับ 1.273 ก./วัน และ 1.288 ก./วัน ในชุดการทดลองแบบไบโอครัมและแบบได้น้ำตามลำดับ

สิริ ทุกข์วินาศ และ ชนินทร์ แสงรุ่งเรือง (2541) ศึกษาการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาระบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพโดยใช้แบคทีเรียระบบเติมอากาศและไม่เติมอากาศ ผลการทดลองพบว่าสามารถลดสารอินทรีย์ในรูปของแอมโมเนียและค่าบีโอดีลงให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ภายในระยะเวลา 7 ชม. โดยค่าบีโอดี ปริมาณไนโตรเจนรวม คลอโรฟิลล์-เอ ตะกอน และปริมาณแบคทีเรียรวมลดลง 24.8-84.8% ซึ่งระบบย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์คำ (2541) ศึกษาเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดซึ่งประกอบด้วยบ่อเลี้ยงกุ้ง บ่อตัวกรองชีวภาพสภาวะใช้ออกซิเจน และคอลัมน์ระบบตัวกรองชีวภาพสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งต่อโดยตรงกับบ่อตัวกรองชีวภาพสภาวะใช้ออกซิเจน ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดชุดควบคุม ซึ่งไม่มีตัวกรองชีวภาพในคอลัมน์ระบบสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งผลการทดลองพบว่าระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียรวม ไนโตรต์ ไนเตรต และปริมาณออกซิเจนละลายให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้ และมีปริมาณไนเตรตอยู่ในระดับต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับที่ไม่เป็นพิษต่อกุ้งกุลาดำ

สรวิศ เผ่าทองสุข และคณะ (2547) ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นพลาสติกสานเป็นรูปทรงกระบอก การทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มควบคุมซึ่งจะเลี้ยงกุ้งในบ่อที่ปกทอพีวีซีโดยไม่ได้มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไว้ภายในบ่อ และกลุ่มทดลองซึ่งจะเลี้ยง

กึ่งในบ่อที่ทำการปักท่อพีวีซีซึ่งภายในบรรจุตัวกรองชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าบ่อเลี้ยงกุ้งทั้งสองระบบสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียในน้ำให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีความเข้มข้นของไนเตรตในท่อพีวีซีแสดงว่ามีกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น โดยกลุ่มทดลองที่มีการใช้ตัวกรองชีวภาพจะสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม

#### 4. การศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียด้วยเทคนิค DGGE

Logemann และคณะ (1998) ศึกษาความหลากหลายของกลุ่มไนตริไฟอิงแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์สำหรับกำจัดแอมโมเนียความเข้มข้นสูง (SHARON) ดำเนินการที่อุณหภูมิ 35 °ซ โดยไม่คิดระยะเวลาพักเก็บตะกอนด้วยเทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุล ทำการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16S rDNA ด้วยเทคนิค PCR และวิเคราะห์ความแตกต่างของยีนตามหลักการของ DGGE ผลการศึกษาพบว่าแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบ 69% มีความคล้ายคลึงกับแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas europaea* spp. ถึง 98.8% ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทำ Fluorescent oligonucleotide probe (NEU) ซึ่งพบว่า 70% ของแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรียที่พบอยู่ในกลุ่มของ *Nitrosomonas cluster* spp.

Grommen และคณะ (2005) ศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรของแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย โดยการนำหัวเชื้อไนตริไฟอิงที่มีจำหน่ายมาทำการเลี้ยงในน้ำจืดและน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 2 เดือน และสุ่มตัวอย่างตัวกรองมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียพบว่าตัวกรองจากน้ำเค็มมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 308±34 มก.ไนโตรเจน/ตัวกรอง/วัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวกรองจากน้ำจืดที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 389±74 มก.ไนโตรเจน/ตัวกรอง/วัน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCR-DGGE พบแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas marina* spp. จากทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม โดยเชื้อจากถังปฏิกรณ์น้ำเค็มพบแถบดีเอ็นเอที่เห็นได้ชัดจำนวน 1 แถบ ในขณะที่น้ำจืดเมื่อทำการเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 1 เดือนพบแถบดีเอ็นเอเพิ่มขึ้น 4-7 แถบ แสดงว่าการเลี้ยงเชื้อในน้ำเค็มจะคัดเลือกแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถอยู่อาศัยได้เท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ขวดโหลพลาสติกปริมาตร 2 ลิตร
- ถังพลาสติกปริมาตร 5 ลิตร
- ถังพลาสติกปริมาตร 20 ลิตร
- ถังพลาสติกปริมาตร 500 ลิตร
- ตัวกลางพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น R-190
- ตัวกลางพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น BCN-009
- เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย
- เครื่องเติมอากาศ
- ใส่กรองอากาศ
- หัวทรายพ่นอากาศ
- สายยางพลาสติก
- เครื่องชั่งน้ำหนักกึ่ง
- เครื่องวัดความยาวกึ่ง

##### 3.1.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- บีกเกอร์
- ปีเปต
- ไมโครปีเปต
- หลอดพลาสติกขนาดเล็ก
- ขวดวัดปริมาตร
- บิวเรต
- กระบอกตวง
- หลอดหยด

- ขวดรูปชมพู่
- แท่งแก้วคนสาร
- หลอดทดลอง
- กระดาษกรอง Whatman GF/C
- เครื่อง Spectrophotometer
- เครื่อง Refractometer
- เครื่อง pH meter
- เครื่อง D.O. meter
- เครื่องอบ
- เครื่อง Autoclave
- เครื่องชั่งสารเคมี
- เครื่องปั่นเหวี่ยง

### 3.1.3 สารเคมี

- Phenol solution (Phenol 20 g ใน 95 % V/V ethyl alcohol)
- Sodium nitropusside solution ( $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Oxidizing solution (Sodium citrate 100 g และ NaOH 5 g ในน้ำ D.I. 500 ml)
- Sodium hypochlorite
- Sodium chloride
- Sodium nitrite
- Sodium bicarbonate
- Sodium hydroxide
- Ammonium chloride
- Sulphanilamide (Sulphanilamide 5 g และ HCl 50 ml)
- NNED solution (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- 90% Acetone
- De-ionized water (D.I.)
- Chlorine
- Cadmium
- Copper sulphate



- Purified potassium peroxdisulphate ( $K_2S_2O_8$ )
- Boric acid ( $H_3BO_3$ )

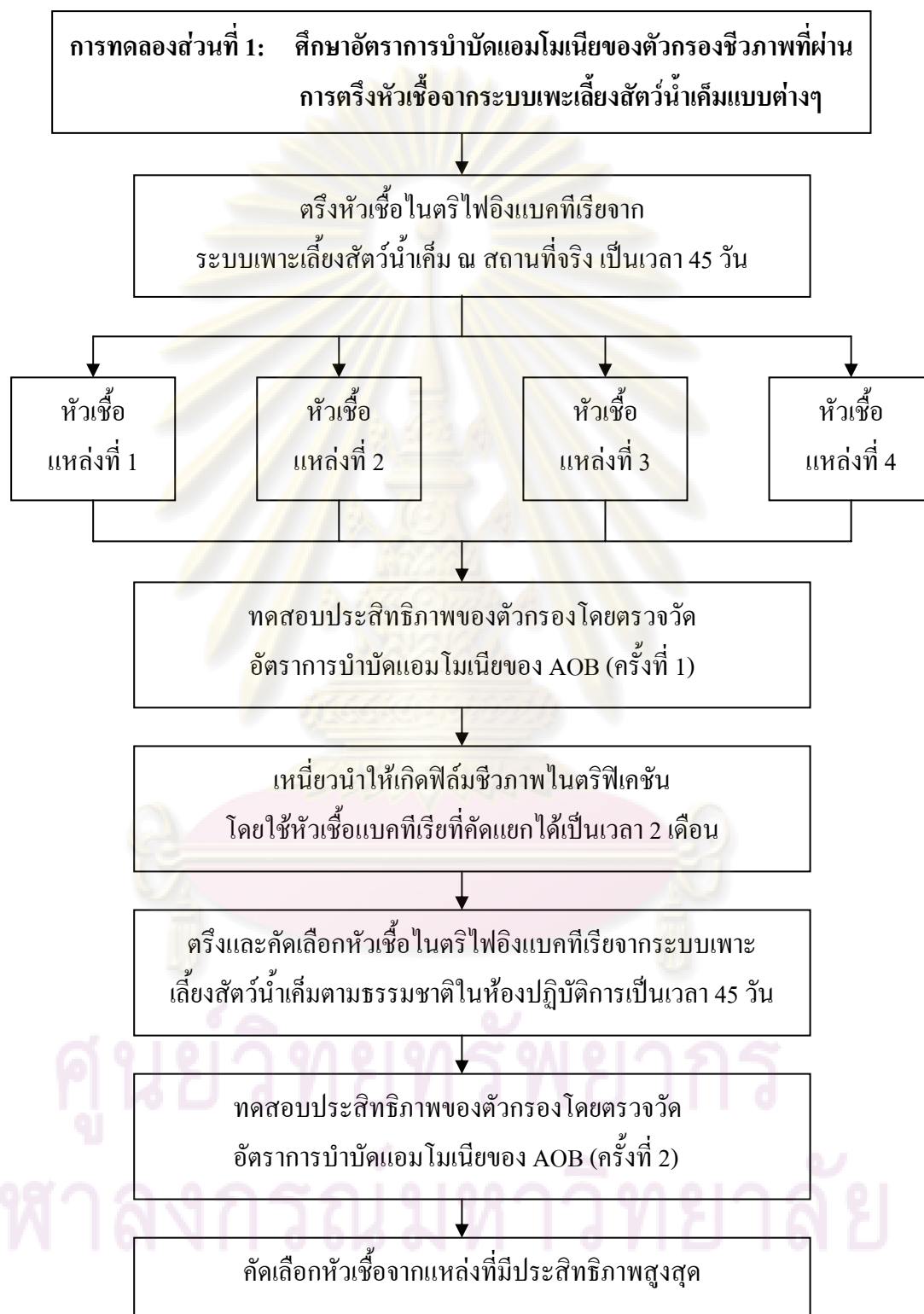
### 3.2 การดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน โดยการศึกษาส่วนแรกเป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหัวเชื้อแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงที่ทำการตรึงจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ เพื่อคัดเลือกแหล่งของหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียประสิทธิภาพสูง การทดลองส่วนที่สองเป็นการนำหัวเชื้อจากแหล่งที่คัดเลือกได้มาศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งาน โดยทำการเลี้ยงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นระยะเวลา 3-6 เดือน สำหรับการทดลองส่วน 3 เป็นการนำตัวกรองชีวภาพซึ่งผ่านการตรึงหัวเชื้อจากแหล่งที่คัดเลือกได้ มาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง โดยการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในถังเลี้ยงกุ้งจำนวน 3 ถัง ได้แก่ ถังควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ ถังที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และถังที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว ทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 3 เดือน และการทดลองส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์บนผิวตัวกรองชีวภาพ โดยนำตัวอย่างตัวกรองจากการทดลองสามส่วนข้างต้นมาทำการศึกษาด้วยเทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุล

#### การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ

การพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดคุณภาพน้ำหมุนเวียนในระบบเลี้ยงกุ้งแบบปิด จะเน้นที่การคัดเลือกหัวเชื้อที่มีไนตริไฟอิงแบคทีเรียประสิทธิภาพสูง โดยการศึกษาส่วนนี้จะเป็นการคัดแยกแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ และทดลองนำหัวเชื้อที่ตรึงได้มาศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย และเปรียบเทียบความสามารถในการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ของ AOB (Ammonia oxidation activity) ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการขยายปริมาณตัวกรองในห้องปฏิบัติการและศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนีย เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดแอมโมเนียในถังเลี้ยงกุ้งต่อไป โดยรูปที่ 3.1 แสดงแผนผัง

สรุปการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 1 และตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. แหล่งของหัวเชื้อเริ่มต้น	- หัวเชื้อจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จำนวน 4 แหล่ง
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาในการตรึงหัวเชื้อเริ่มต้น	- 45 วัน
2. จำนวนตัวกรองชีวภาพ	- 20 – 25 ชั้น/แหล่งหัวเชื้อ
3. ความเค็มของน้ำทะเล	- 30 พีเอสยู
4. ความเข้มข้นแอมโมเนีย	- 3 มก.ไนโตรเจน/ล.
5. ระยะเวลาในการเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพในตรีฟิเคชัน	- 2 เดือน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพของตัวกรอง (อัตราการบำบัดแอมโมเนียที่เทียบเคียงกับพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา ; $\text{mg-N/m}^2 \text{ surface area /day}$ )	- การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นต่างของน้ำ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ

### 1. การตรึงและคัดเลือกหัวเชื้อในตรีฟิเคชันแบบที่เรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ

เป็นการคัดเลือกแหล่งของหัวเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดแอมโมเนียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ 4 แหล่ง ที่มีค่าความเค็มอยู่ในช่วง 20-30 พีเอสยู ได้แก่

1. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งแบบความหนาแน่นสูง ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวเชื้อจากระบบเพาะเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน
2. ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวเชื้อจากระบบคุณภาพน้ำหมุนเวียนสำหรับสถานแสดงพันธุ์สัตว์น้ำ
3. บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งของบรรงฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวเชื้อจากระบบธรรมชาติแบบบ่อดินกลางแจ้ง

4. บ่อดินเลี้ยงหอยหวานของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการเพาะเลี้ยงหอยหวาน สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งจะเป็นตัวแทนของหัวเชื้อจากระบบบ่อดินเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง

- *ตัวกลางพลาสติกและการเตรียมตัวกลางก่อนการใช้งาน*

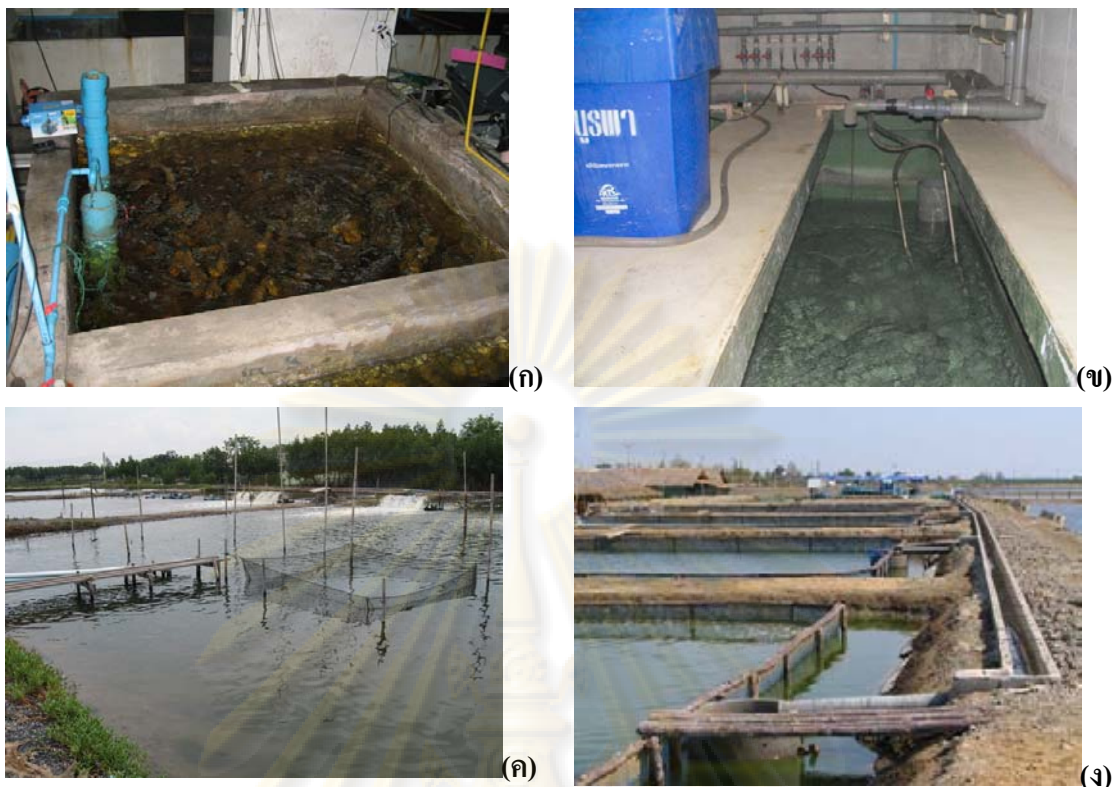
ตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) ชนิดช่วยกระจายการไหลของน้ำให้ทั่วทั้งพื้นผิว (Random Flow Plastic Media) รุ่น R-190 ของบริษัท Aqua Nishihara Corporation LTD. ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. สูง 22 มม. มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) เท่ากับ 0.02 ตร.ม./ชิ้น หรือ 190 ตร.ม./ลบ.ม.ของตัวกลาง โดยก่อนนำตัวกลางพลาสติกไปใช้ในการทดลองจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน และนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70-80 °ซ



รูปที่ 3.2 วัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน รุ่น R-190

- *การตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม ณ สถานที่จริง*

การตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเริ่มต้นบนตัวกลางพลาสติกจะดำเนินการโดยผูกชิ้นส่วนของตัวกลางจำนวน 20-25 ชิ้นด้วยเชือกไนลอน และนำไปแช่ไว้ในน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความลึกประมาณ 30 ซม. จากผิวน้ำเป็นเวลาประมาณ 45 วัน ณ สถานที่จริงของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ ทั้ง 4 แห่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นจึงนำตัวกรองชีวภาพจากแต่ละแหล่งมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียในห้องปฏิบัติการ



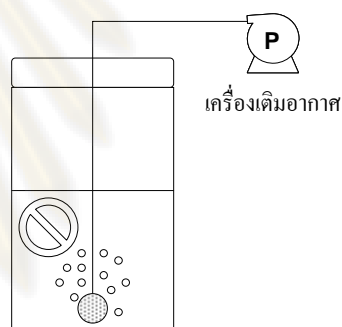
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสถานที่จริงของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆที่ได้นำตัวกลางพลาสติกไปทำการตรึงหัวเชื้อไนโตรฟีอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน

- (ก) ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- (ข) ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา
- (ค) บ่อคินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จังหวัดฉะเชิงเทรา
- (ง) บ่อคินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี

- การทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองโดยการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแหล่งต่างๆ 4 แหล่ง ผ่านกระบวนการไนโตรฟิกชัน โดยนำตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อแล้วจากแต่ละแหล่ง มาแยกใส่ลงในถังปฏิกรณ์ขวดโหลพลาสติกใสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม. สูง 21.5 ซม. ที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 1 ลิตร เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ทำการเติมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวทรายพ่นอากาศที่ต่อเข้ากับชุดเครื่องเติมอากาศ (AquaTech, Model A-T 2001) ที่มีไส้กรองอากาศขนาด 0.3 ไมครอน (PURE PE Capsule Filter) เพื่อให้อากาศที่เข้าถึงปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะปลอดเชื้อ (รูปที่ 3.4) โดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงจากแต่ละแหล่งจะทำการ

ตรวจวัดจำนวน 3 ซ้ำ ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์เป็นระยะ โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนโตรต์ ไนเตรต และวิเคราะห์คุณภาพน้ำต่างๆ ได้แก่ ความเป็นด่างของน้ำ (AQUA-VBC, Alkalinity for Sea and Fresh Water) ความเค็ม (Atago, S/Mill-E) ความเป็นกรด-ด่าง (YSI, pH 10) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (HANNA, HI 91410) และอุณหภูมิ ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992) โดยความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของความเข้มข้นแอมโมเนียและหยุดเก็บน้ำเมื่อไม่สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำได้ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรงจากแต่ละแหล่งเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา (มก.-ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน) (Specific Surface Area; SSA หน่วย  $\text{mg-N/m}^2$  surface area /day) เพื่อคัดเลือกแหล่งของหัวเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อนำไปตรึงบนตัวกรองสำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองโดยตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย (แสดงรายละเอียดสำหรับ 1 แหล่ง)

## 2. การเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพไนทรีย์ไฟเคชันโดยใช้หัวเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้

เป็นการนำตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย (Active Biofilter) มาใช้เป็นแหล่งของหัวเชื้อไนทรีย์ไฟอิงแบคทีเรีย เพื่อเพิ่มจำนวนโดยการตรึงลงบนตัวกลางพลาสติกใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อนในห้องปฏิบัติการ โดยนำตัวกลางพลาสติก R-190 ที่ผ่านการเตรียมสภาพเป็นตัวกรองชีวภาพมาแล้ว (มีหัวเชื้อไนทรีย์ไฟอิงแบคทีเรียตรึงอยู่) จำนวน 3 ซิน มาใส่ในถังบรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พิเอสยู ปริมาตร 15 ลิตร รวมกับตัวกลางพลาสติกใหม่จำนวน 17 ซิน ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนมาแล้ว เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าความเป็นด่างของน้ำให้ได้ความเข้มข้น 100-150 มก./ล. ตลอดจนการทดลอง จัดให้มีหัวทรายพ่นอากาศในถังอย่างต่อเนื่อง ทำการสูบลู่วางตัวกรองชีวภาพ

มาตรฐานวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียทุก 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 2 เดือน และเก็บตัวอย่างตัวกรองชีวภาพเพื่อตรวจสอบลักษณะการยึดเกาะของแบคทีเรียที่พื้นผิว โดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

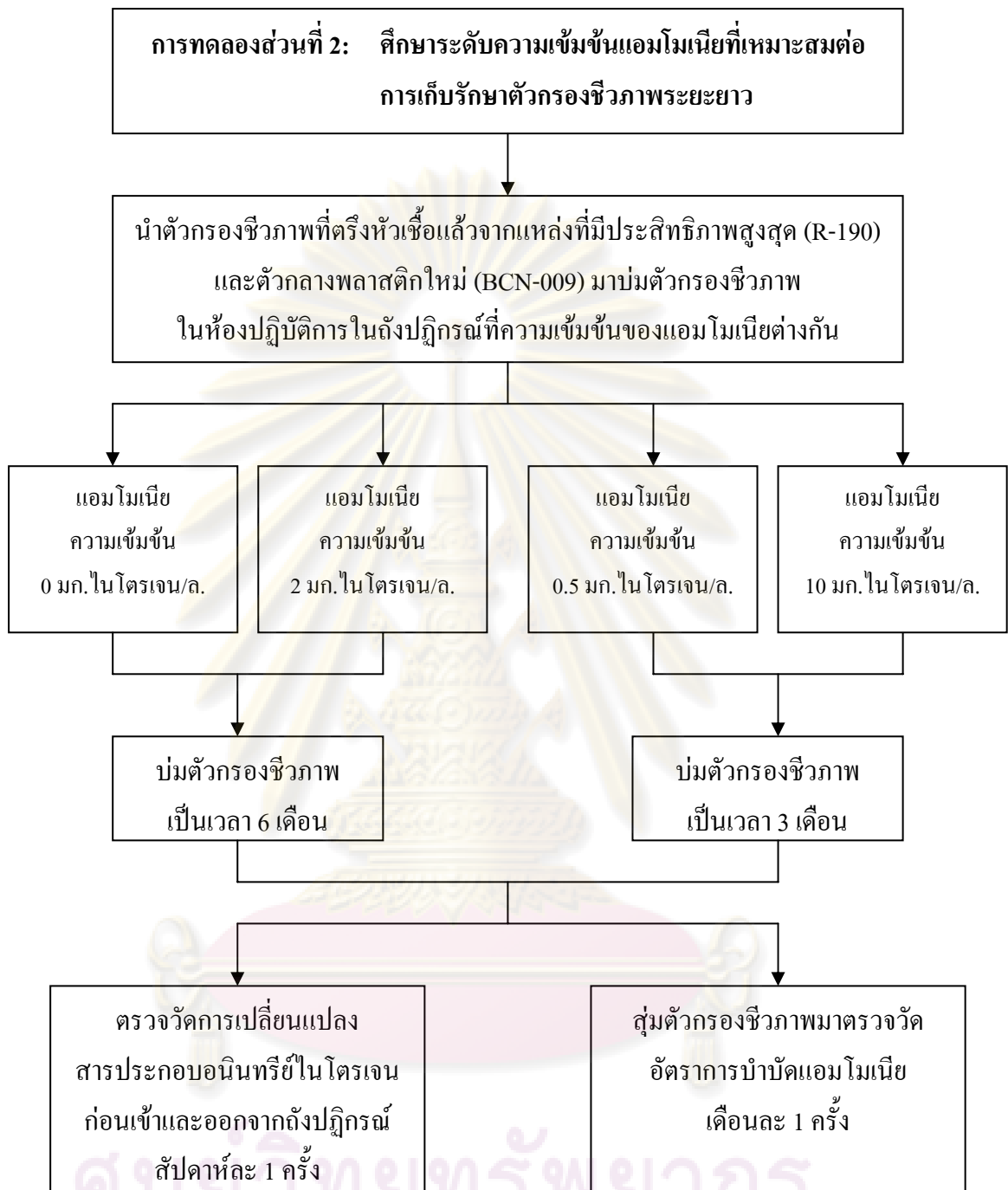
### 3. การตรึงและคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มตามธรรมชาติในห้องปฏิบัติการ

เป็นการนำตัวอย่างน้ำและดินตะกอนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มตามธรรมชาติ 2 แหล่ง ได้แก่ บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งของบรจฟาร์ม จ.ฉะเชิงเทรา และบ่อดินเลี้ยงหอยหวานของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการเพาะเลี้ยงหอยหวาน จ.เพชรบุรี มาทำการทดลองตรึงหัวเชื้อและเพิ่มจำนวนบนผิวของตัวกรองใหม่ในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำและตัวกรองชีวภาพในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์เค็มที่เป็นตัวแทนของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรียน

โดยการบรรจุตัวกลางพลาสติก R-190 ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวกลางก่อนการใช้งาน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา จำนวน 10 ชิ้น ลงในถังปฏิกรณ์พลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ซม. สูง 32.5 ซม. แต่ละถังบรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 15 ลิตร และนำตัวอย่างจากแหล่งของหัวเชื้อแต่ละแหล่งถึงละ 2 ลิตร เติมตะกอนดินจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำลงไปด้วยประมาณถึงละ 10 มล. เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก./ลิ. ในโตรเจน/ลิ. และโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าความเป็นด่างในน้ำให้ได้ความเข้มข้น 100-150 มก./ลิ. แช่ตัวกลางพลาสติกไว้ในถังปฏิกรณ์แต่ละถังเป็นระยะเวลา 45 วัน ทำการสุ่มตัวอย่างตัวกรองชีวภาพมาทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียในห้องปฏิบัติการ

### การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพระยะยาว

การเตรียมตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งาน มีความสำคัญต่อการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิดและระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ซึ่งตามปกติจะต้องใช้เวลาในการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่น้อยกว่า 30-45 วัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างต่ำและมีปริมาณน้อย ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งาน และการเก็บรักษาให้มีประสิทธิภาพระยะยาวในห้องปฏิบัติการจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก โดยรูปที่ 3.5 แสดงแผนผังสรุปการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 2 และตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนนี้



รูปที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



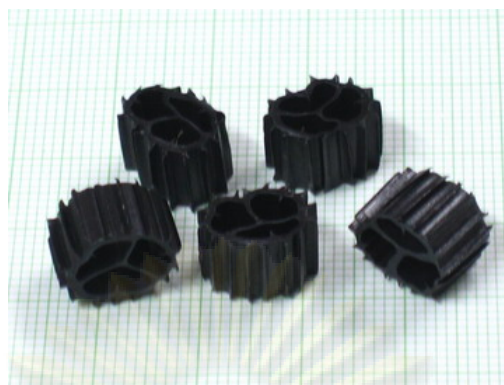
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่แตกต่างกันในแต่ละถังปฏิกรณ์	- แอมโมเนียความเข้มข้น 0, 0.5, 2 และ 10 มก. ในโตรเจน/ล.
2. การเจริญของแบคทีเรียบนตัวกรองชนิดใหม่	- อัตราการบำบัดแอมโมเนีย
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาแช่ตัวกรองชีวภาพ	- 3 และ 6 เดือน
2. จำนวนตัวกรองชีวภาพที่ตรึงแล้ว (R-190)	- R-190 เท่ากับ 3 ชั้น
3. จำนวนตัวกลางพลาสติกใหม่ (BCN-009)	- BCN-009 เท่ากับ 100 ชั้น
4. ความเค็มของน้ำทะเล	- 30 พีเอสยู
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพของตัวกรอง (อัตราการบำบัดแอมโมเนียที่เทียบเคียงกับพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา ; $\text{mg-N/m}^2 \text{ surface area /day}$ )	- การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นด่างของน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ

- ตัวกลางพลาสติกและการเตรียมก่อนการใช้งาน

ตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด โดยชนิดแรกเป็นตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วจากแหล่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ผ่านการคัดเลือกจากการทดลอง ส่วนที่ 1 เป็นระยะเวลา 45 วัน ซึ่งเป็นวัสดุพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น R-190 ส่วนตัวกลางพลาสติกชนิดที่ 2 เป็นตัวกลางพลาสติกใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานชนิดพลาสติกโพลีเอธิลีน รุ่น BCN-009 (2H, Germany) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. สูง 8 มม. มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 864 ตร.ม./ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยก่อนการใช้งานจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70-80 °ซ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

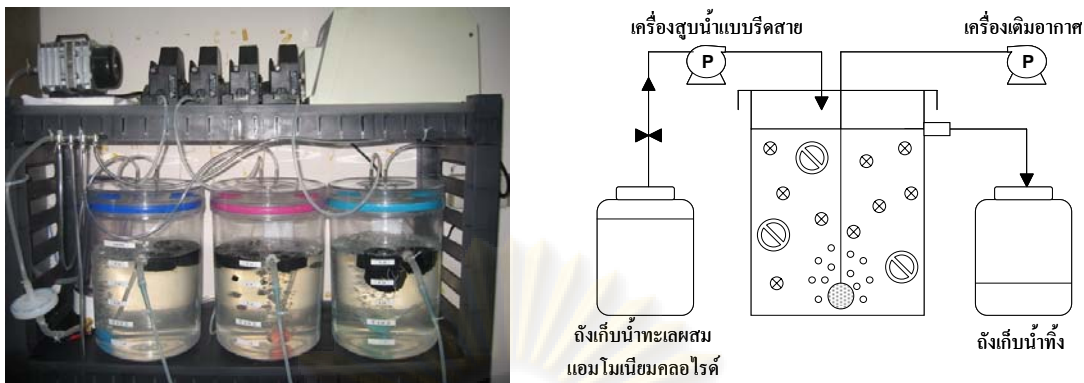


รูปที่ 3.6 ตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีน รุ่น BCN-009

- การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกัน

เป็นการศึกษาสภาพการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน ได้แก่ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแต่ละชุดการทดลองจะใช้ถังปฏิกรณ์พลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม. ปริมาตรน้ำ 5 ลิตร บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วและผสมแอมโมเนียมคลอไรด์ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ปรับสภาพความเป็นค่าของน้ำให้มีค่าอยู่ในช่วง 100-120 มก./ล. ทำการเติมอากาศพ่นลงในน้ำด้วยหัวทราย และมีช่องเติมน้ำทะเลเข้าสู่ภายในถังปฏิกรณ์ตลอดเวลาด้วยเครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic Pump, Masterflex L/S Model 7524-55) ที่อัตราการไหล 0.1 มล.ต่อนาที และระยะเวลาเก็บน้ำ (Retention Time) ประมาณ 12 ชม. โดยน้ำที่ไหลล้นจากถังปฏิกรณ์จะถูกระบายออกทางช่องระบายน้ำ

บรรจุตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วจากแหล่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ผ่านการคัดเลือกจากการทดลองส่วนที่ 1 ลงในถังปฏิกรณ์แต่ละถัง จำนวนถึงละ 3 ชิ้น ร่วมกับตัวกลางพลาสติกใหม่รุ่น BCN-009 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว จำนวน 100 ชิ้น ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยถังปฏิกรณ์ที่บ่มตัวกรองชีวภาพในรีไฟอิงแบคที่เรียที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 6 เดือน ส่วนถังปฏิกรณ์ที่บ่มตัวกรองชีวภาพที่ความเข้มข้น 0.5 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. จะเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 เดือน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์และถังปฏิกรณ์สำหรับการบ่มตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกัน (แสดงรายละเอียดสำหรับ 1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย)

- การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน

การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกันจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะทำการทดลองสัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเลผสมแอมโมเนียมคลอไรด์ที่มีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างๆ เท่ากับ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. จากขวดเก็บสารละลายเพื่อใช้ (Stock Solution) ก่อนเข้าถังปฏิกรณ์และตัวอย่างน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์แต่ละถัง เมื่อครบระยะเวลา 24 ชม. มาตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ด้วยวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992)

ส่วนที่ 2 เป็นการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่มีระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน โดยทำการทดลองเดือนละครั้ง ทุกๆเดือนจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ด้วยการสุ่มตัวอย่างตัวกรองชีวภาพ BCN-009 จำนวน 30 ชิ้น จากแต่ละชุดการทดลองมาใส่ลงในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร จำนวน 3 ถัง ถึงถังละ 10 ชิ้น บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 1 ลิตร และเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. เติมนโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าความเป็นด่างของน้ำให้มีค่าอยู่ในช่วง 100-120 มก./ล. โดยทำการทดลอง 3 ชั่วโมงในแต่ละความเข้มข้นของแอมโมเนีย (รูปที่ 3.8) จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต และนำผลที่ได้มาคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา (มก.-ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน) และทุกๆ 2 เดือนจะเก็บตัวอย่างตัวกรองชีวภาพเพื่อตรวจสอบลักษณะการยึดเกาะของแบคทีเรียที่พื้นผิวโดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

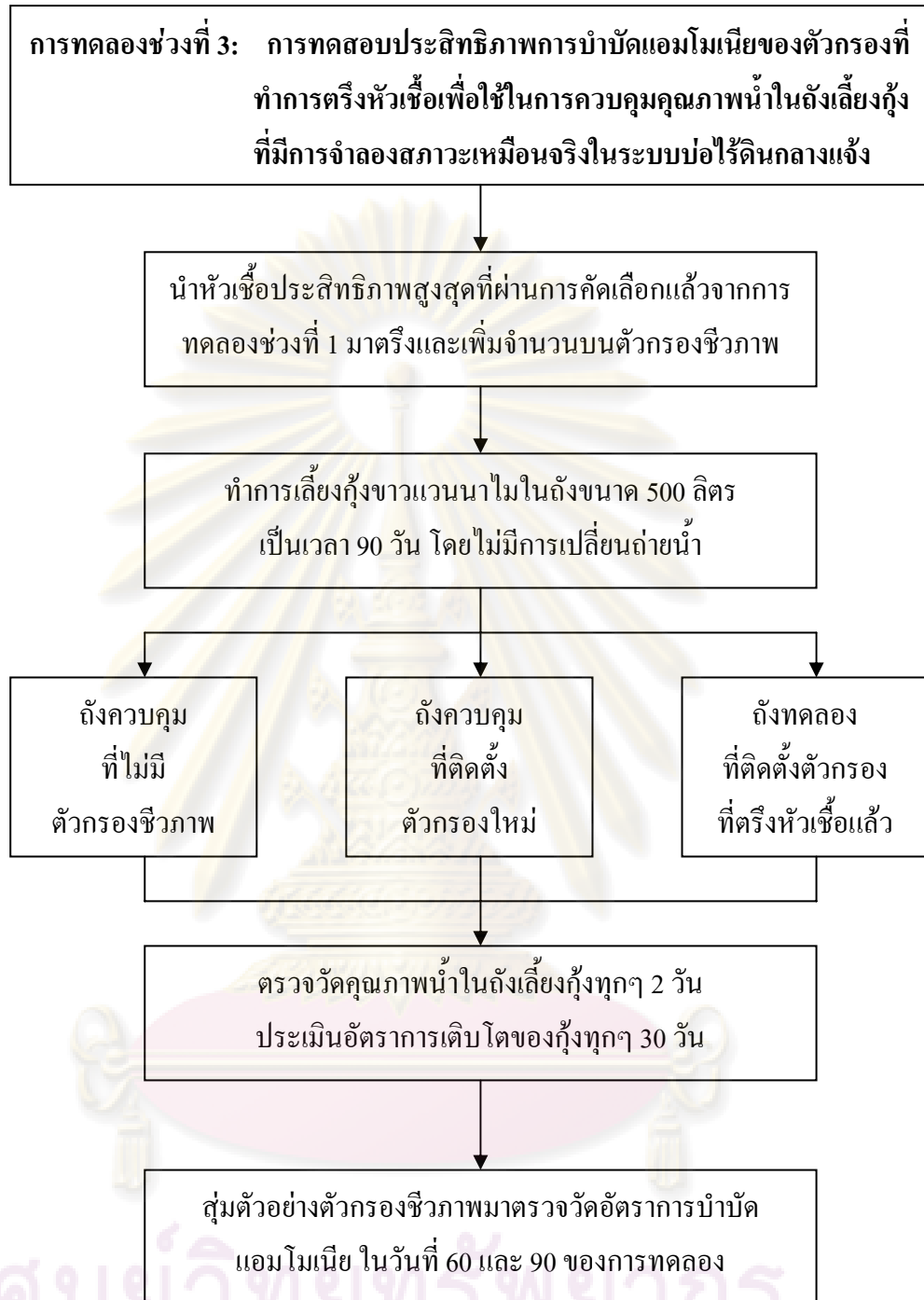


รูปที่ 3.8 การทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน

**การทดลองส่วนที่ 3** การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองที่ทำการตรึงเชื้อเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสถานะเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการนำตัวกรองชีวภาพซึ่งผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสถานะการเลี้ยงกุ้งเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างการเลี้ยงกุ้งในสถานะที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการใช้งานกับชุดควบคุมซึ่งประกอบด้วยถังควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพและถังควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ โดยแสดงแผนผังการทดลองส่วนนี้ในรูปที่ 3.9 และแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในตารางที่ 3.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 3

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดถังทดลองเลี้ยงกุ้ง	- ถังควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ ถังควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองใหม่ และถังทดลองที่ติดตั้งตัวกรองที่ตรงหัวเชื้อจากแหล่งที่มีประสิทธิภาพสูง
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม	- 3 เดือน
2. จำนวนตัวกรองชีวภาพ	- ขึ้นอยู่กับอัตราการบำบัดแอมโมเนียตัวกรอง (SSA; หน่วย $\text{mg-N/m}^2$ surface area /day)
3. ความเค็มของน้ำทะเล	- 30 พีเอสยู
4. ขนาดและความหนาแน่นของกุ้งขาวแวนนาไม	- กุ้งขาวแวนนาไมน้ำหนักเฉลี่ย $7.29 \pm 1.80$ ก. ความยาวเฉลี่ย $9.29 \pm 0.77$ ซม. ความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรอง (อัตราการบำบัดแอมโมเนียที่เทียบเคียงกับพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา ; $\text{mg-N/m}^2$ surface area /day)	- คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรด
2. อัตราการรอดของกุ้ง	- จำนวนกุ้งที่เหลือเมื่อจบการทดลอง
3. อัตราการเติบโตต่อวัน	- น้ำหนักและความยาวของกุ้ง
4. ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ	- ปริมาณสารสีที่สกัดจากแพลงก์ตอนพืช

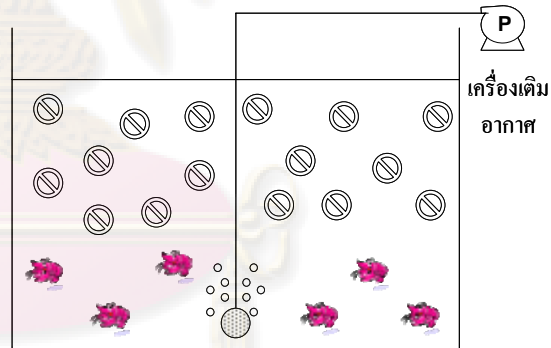
- ตัวกลางพลาสติกและตัวกรองชีวภาพ

จัดเตรียมตัวกลางพลาสติกที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (ใหม่) โดยการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนและอบให้แห้งตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่จะใช้ในการทดลอง ดำเนินการโดยนำตัวกลางพลาสติก R-190 ไปแช่ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลองส่วนที่ 1 ก่อนเป็นเวลา 45 วัน เพื่อให้เกิดการเจริญเติบโตและเกาะติดของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

- การเลี้ยงกุ้งและสภาวะในการเลี้ยงกุ้ง

ทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก. และความยาวเฉลี่ย  $9.29 \pm 0.77$  ซม. จำนวนถังละ 30 ตัว โดยคิดเป็นความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม. ในถังพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ซม. สูง 75 ซม. ที่บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ปริมาตร 450 ลิตร โดยก่อนเริ่มทำการทดลองได้เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปเพื่อปรับความเป็นด่างของน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 150 มก./ล. และติดตั้งระบบให้อากาศถังละ 4 จุด กระจายอยู่ทั่วถังเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อกุ้งและไนตริไฟอิงแบคทีเรีย รวมถึงการวางตาข่ายพลาสติกเพื่อให้กุ้งสามารถยึดเกาะอาศัยอยู่ได้ จัดวางถังเลี้ยงกุ้งเหล่านี้ในบริเวณที่ได้รับแสงธรรมชาติเพื่อให้มีสภาพคล้ายคลึงกับบ่อไร้ดินกลางแจ้ง รวมทั้งมีฉากกันพลาสติกป้องกันน้ำฝนไหลลงสู่ระบบทดลอง (รูปที่ 3.10)

สำหรับการให้อาหารกุ้งจะใช้อาหารที่มีขายตามท้องตลาด โดยคำนวณปริมาณอาหารที่ให้จากร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวและเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่อกุ้งมีการเจริญเติบโต ทำการเลี้ยงกุ้งต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 วัน โดยวันเริ่มต้นของการทดลอง (วันที่ 0) เป็นวันที่เริ่มปล่อยกุ้งลงในถังเลี้ยงกุ้ง และไม่มี การเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ยกเว้นการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยความเค็มที่เพิ่มขึ้นจากการระเหยของน้ำในถังเลี้ยงกุ้ง



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะเหมือนจริงในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (แสดงรายละเอียดต่อ 1 ถึงการทดลอง)

- การประเมินอัตราการเติบโตของกุ้ง

ทำการติดตามการเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมตลอดการทดลองเป็นเวลา 90 วัน ด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของกุ้งทุกตัวในวันที่ 30, 60 และ 90 ของการทดลอง (รูปที่ 3.11) เพื่อใช้คำนวณน้ำหนักและความยาวเฉลี่ย อัตราการเติบโตของกุ้งต่อวัน (Daily weight gain) ร้อยละอัตราการรอดของกุ้ง (Survival rate of shrimp) อัตราการแลกเนื้อ (Feed conversion ratio) และผลผลิตของกุ้ง (Production of shrimp) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการเติบโตต่อวัน (ก./วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (ก.)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}}$$

$$\text{อัตราการรอด (ร้อยละ)} = \frac{\text{จำนวนกุ้งที่เหลือ} \times 100}{\text{จำนวนกุ้งที่ปล่อยทั้งหมด}}$$

$$\text{อัตราการแลกเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ให้กุ้งทั้งหมด (กก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของกุ้งที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (กก.)}}$$

$$\text{ผลผลิต (กก./ไร่)} = \frac{\text{น้ำหนักรวมของกุ้งทั้งหมด (กก.)}}{\text{พื้นที่บ่อ (ไร่)}}$$



วัดความยาวกุ้ง



ชั่งน้ำหนักกุ้ง

รูปที่ 3.11 การศึกษาอัตราการเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมโดยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนักกุ้ง



- การตรวจวัดคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้ง

การประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมคุณภาพน้ำจะดำเนินการโดยการตรวจวัดคุณภาพน้ำต่างๆ ของตัวอย่างน้ำในถังเลี้ยงกุ้งเป็นระยะตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.4 ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต สภาพความเป็นด่างของน้ำ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ และปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ทุกๆ 2 วัน ตลอดจนการทดลอง และเก็บตัวอย่างตัวกรองชีวภาพมาตรวจสอบลักษณะการยึดเกาะของแบคทีเรียที่พื้นผิวโดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในวันที่ 30, 60 และ 90 ของการทดลอง

ตารางที่ 3.4 คุณภาพน้ำ ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้ง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่เก็บ	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	อ้างอิงวิธีการวิเคราะห์
แอมโมเนีย	ทุก 2 วัน	Colorimetric and Spectrophotometric method	APHA (1992)
ไนไตรต์	ทุก 2 วัน	Colorimetric and Spectrophotometric method	APHA (1992)
ไนเตรต	ทุก 2 วัน	Colorimetric and Spectrophotometric method	APHA (1992)
ความเป็นด่างของน้ำ	ทุก 2 วัน	Titration method	ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ อุษา วิเศษสุนัน (2535)
คลอโรฟิลล์-เอ	ทุก 2 วัน	Solvent extraction method and Spectrophotometric method	Strickland และ Parson (1972)
ความเป็นกรด-ด่าง	ทุก 2 วัน	pH meter method (YSI, pH 10)	APHA (1992)
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	ทุก 2 วัน	D.O. meter method (HANNA, HI 91410)	APHA (1992)
อุณหภูมิ	ทุก 2 วัน	Logging pH meter method (YSI, pH 10)	APHA (1992)
ความเค็ม	ทุก 2 วัน	Refractometer method (Atago, S/Mill-E)	APHA (1992)
ไนโตรเจนทั้งหมด	สิ้นสุดการทดลอง	Spectrophotometric method	Grasshoff และคณะ (1999)
ของแข็งแขวนลอย	สิ้นสุดการทดลอง	Total solids dried at 103-105°C	APHA (1992)

- การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ

การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่นำมาใช้ควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งจำลอง จะดำเนินการ โดยสุ่มตัวอย่างตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่จะติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว ก่อนการทดลองและในวันที่ 60 และ 90 ของการทดลองเลี้ยงกุ้ง เพื่อมาประเมินประสิทธิภาพของอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ในห้องปฏิบัติการชุดการทดลองละ 3 ชั้น แยกตัวกรองชีวภาพใส่ลงในถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถึง ถึงละ 1 ชั้น ซึ่งบรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 1 ลิตร เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก. ในโตรเจน/ล. และโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าความเป็นด่างของน้ำให้ได้ความเข้มข้น 100-120 มก./ล. จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนีย ในไนโตรต์ และไนเตรตของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ด้วยวิธีมาตรฐาน (APHA, 1992) นำผลที่ได้มาคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งแต่ละถัง โดยตัวอย่างตัวกรองชีวภาพในวันที่ 30, 60 และ 90 ของการทดลอง จะถูกสุ่มมาเพื่อตรวจสอบลักษณะการยึดเกาะของแบคทีเรียบนพื้นผิวโดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

**การทดลองส่วนที่ 4 การวิเคราะห์หาความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพ**

การทดลองในส่วนนี้เลือกใช้เทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุลเพื่อศึกษาความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ โดยการนำตัวอย่างตัวกรองชีวภาพที่ต้องการศึกษามาทำการสกัดแยกดีเอ็นเอรวมของจุลินทรีย์ และทำการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16S rDNA ด้วยเทคนิค PCR จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างของยีนที่ทำการเพิ่มจำนวนโดยการแยกด้วยไฟฟ้าบนโพลีอะครีลาไมด์เจลตามหลักการของ DGGE ซึ่งตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างมาจากชุดการทดลองในส่วนที่ 1-3

ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์

สารเคมีสำหรับสกัดดีเอ็นเอ	สารเคมีสำหรับ PCR	สารเคมีสำหรับ DGGE
1. โซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์	1. 10X PCR buffer	1. 40% Acrylamide
2. MT buffer	2. dNTP mix	2. 50X TAE
3. PPS Reagent	3. Primer CTO 189A/Bf-GC	3. Formamide
4. Binding Matrix Suspension	4. Primer CTO 189Cf-GC	4. Urea
5. SEWS-M	5. Primer CTO654r	5. APS
6. DES	6. Tag DNA Polymerase	6. TEMED
	7. Distilled water	7. Dye solution
	8. Template DNA	

ตารางที่ 3.6 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์

อุปกรณ์	ยี่ห้อ	รุ่น
1. ชุดอุปกรณ์สำเร็จรูปสำหรับการสกัด แยกดีเอ็นเอ (Fast DNA SPIN kits for soil)	QBiogene, Solon, Ohio, USA	-
2. เครื่องผสมสาร	Scientific Industries, Inc.	Vortex-Genie 2
3. เครื่องเขย่าสาร (Fast PREP Instrument)	Thermo Electron Corporation	Fast PREPTM FP 120
4. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)	Eppendorf	5804R
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ สำหรับทำ PCR	Thermo Electron Corporation	HB-PX-2220
6. เครื่องแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้า (DNA Electrophoresis Gel Boxes)	Bioactive, Inc.	-
7. DGGE (D Code system)	Bio-Rad Laboratories, Inc.	-
8. เครื่อง UV Transilluminator Gel	Wealtec	Gel Dolphin-DOC

## 1. ขั้นตอนการวิเคราะห์ 16S rDNA ด้วยวิธี PCR – DGGE

สำหรับวิธีการต่างๆ โดยละเอียดที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- การสกัดแยกดีเอ็นเอรวมของจุลินทรีย์ที่เติบโตบนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ

แช่ตัวอย่างตัวกรองชีวภาพใน 1X TAE Buffer ในหลอดทดลองนำไปเขย่าในอ่างที่อาศัยการสั่นสะเทือนด้วยคลื่นเสียง (Sonication) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้จุลินทรีย์หลุดออกจากตัวกรองชีวภาพ ทำการกรองด้วยกระดาษกรองและนำเฉพาะตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรองมาทำการสกัดแยกดีเอ็นเอรวมของจุลินทรีย์โดยใช้ชุดสกัดแยกดีเอ็นเอสำเร็จรูป (QBiogene, Solon, Ohio, USA) และดำเนินการตามวิธีที่ระบุโดยผู้ผลิตซึ่งมีรายละเอียดแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนการสกัดแยกดีเอ็นเอออกจากตัวอย่าง

นำตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรองมาใส่ลงในหลอดพลาสติกขนาดเล็ก (Eppendorf) เติมโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 1 มล. นำไปปั่นรวมด้วยเครื่องผสม (Vortex mixer) จนตัวอย่างและบัฟเฟอร์เข้ากันดีจึงทำการย้ายตะกอนตัวอย่างทั้งหมดมาใส่ลงในหลอด Lysin Matrix E ซึ่งมีลูกแก้วขนาดเล็กที่ช่วยในการทำให้เซลล์แตกและดีเอ็นเอหลุดออกจากตะกอนตัวอย่าง จากนั้นเติม MT buffer 122 ไมโครลิตร เขย่าหลอดตัวอย่างด้วยเครื่องเขย่า (FastPep Instrument) โดยใช้ความเร็วระดับ 5.5 เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจึงนำหลอดตัวอย่างไปปั่นที่ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที ด้วยเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อให้เกิดการตกตะกอน ในที่สุดจะได้ดีเอ็นเอที่ละลายอยู่ในสารละลายที่แยกชั้นกับตะกอนตัวอย่าง

- ขั้นตอนการทำความสะอาดดีเอ็นเอที่แยกได้

เทเฉพาะส่วนน้ำใสที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นลงในหลอดพลาสติกขนาดเล็ก เติม PPS Reagent 250 ไมโครลิตร ทำการเขย่าด้วยมือ 10 ครั้งอย่างช้าๆ นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นเทเฉพาะส่วนน้ำใสลงในหลอดใหม่ เติม Binding Matrix Suspension 1 มล. เขย่าด้วยมือเป็นเวลา 2 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 3 นาที จะได้ดีเอ็นเอที่อยู่ในรูปสารละลาย

- *ขั้นการชะดีเอ็นเอออกจากตัวกรอง*

ส่วนน้ำใสจากขั้นตอนข้างต้นทิ้งในปริมาตร 500 ไมโครลิตร แล้วคูดน้ำใสส่วนที่เหลือลงในหลอด Spin Filter ซึ่งเป็นหลอดที่มีแผ่นกรองอยู่ด้านบน นำหลอดตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้เกิดการกรองดีเอ็นเอออกจากสารละลาย โดยดีเอ็นเอจะติดอยู่บนแผ่นกรองส่วนสารละลายจะไหลลงสู่ด้านล่างของหลอด เทสารละลายด้านล่างทิ้ง แล้วเติม SEWS-M 500 ไมโครลิตร เพื่อเป็นการล้างสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่กับดีเอ็นเอออกไป นำหลอดตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เทส่วนน้ำใสด้านล่างทิ้ง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้งด้วยความเร็วรอบเดิม เป็นเวลา 2 นาที ทำการย้ายตัวกรองมาใส่ในหลอด Catch Tube และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที เติม DES 50 ไมโครลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ดีเอ็นเอที่อยู่บนแผ่นกรองละลายและหลุดออกมากับสารละลาย DES โดยสุดท้ายจะได้สารละลายดีเอ็นเอบริสุทธิ์ปริมาตร 50 ไมโครลิตร

- *การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างดีเอ็นเอ โดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า*

นำตัวอย่างดีเอ็นเอที่สกัดได้มาตรวจสอบโดยใช้ 1% อะกาโรสเจล ใน 1X TAE Buffer ทำการแยกด้วยไฟฟ้าในเครื่อง Horizontal DNA Electrophoresis Gel Boxes (Bioactive) และใช้ 1 Kb DNA Ladder (Biolabs) เป็น DNA maker ทำการเดินระบบการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrophoresis) โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที หรือจนเห็นสีข้อมลงมาถึงประมาณ 2/3 ของเจล จากนั้นตรวจดูดีเอ็นเอที่สกัดได้ด้วย UV Transilluminator (Gel Dolphin-DOC,NV,USA)

- *การเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสาย 16S rDNA ด้วยวิธี PCR*

การเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสาย 16S rDNA ในการทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้ CTOs primer sets (Prologo, Boulder, CO LTD, USA) โดยในหนึ่งหลอดปฏิกิริยา (Reaction tube) จะประกอบด้วยชุด Primer (Primer set) สำหรับ 16S rDNA ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ primer CTO 189A/Bf-GC ผสมกับ primer CTO 189Cf-GC ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 (ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.7) PCR Buffer 10X 5 ไมโครลิตร, dNTPs 4 ไมโครลิตร Taq DNA Polymerase 0.5 ไมโครลิตร น้ำกลั่น 28.5 ไมโครลิตร และ DNA Template 2 ไมโครลิตร คิดเป็นปริมาตรรวมของ 1 reaction เท่ากับ 50 ไมโครลิตร

ตารางที่ 3.7 แสดงชุด Primer สำหรับ 16S rDNA ที่ใช้ในงานวิจัย

Primer	Target site	Nucleotide Sequence (5'-3')	Specificity	Reference
CTO 189A/Bf-GC	189-207	CGC CCG CCG CGC GGC GGG CGG GGC GGG GGC ACG GGG GGA GRA AAG CAG GGG ATC G	β-AOB	Kolwachuk และคณะ (1997)
CTO 189Cf- GC	189-207	CGC CCG CCG CGC GGC GGG CGG GGC GGG GGC ACG GGG GGA GGA AAG TAG GGG ATC G	β-AOB	Kolwachuk และคณะ (1997)
CTO654r	633-654	CTA GCY TTG TAG TTT CAA ACG C	β-AOB	Kolwachuk และคณะ (1997)

สำหรับสภาวะของการเพิ่มจำนวนยีนด้วยเครื่อง PCR (Thermo Electron Corporation) มีโปรแกรมอุณหภูมิดังนี้

Initial denaturation	94°ซ	2 นาที	} 35 รอบ
Denaturing	94°ซ	30 วินาที	
Annealing	53°ซ	45 วินาที	
Extension	72°ซ	45 วินาที	
Final Extension	72°ซ	5 นาที	
End	4°ซ		

ทำการตรวจสอบดีเอ็นเอที่ได้จากขั้นตอน PCR อีกครั้งด้วยวิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้าตามวิธีที่ได้กล่าวไปข้างต้น

- การวิเคราะห์ความแตกต่างของยีนด้วยวิธีเทคนิค DGGE

- การเตรียม โพลีอะครีลาไมด์เจล

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าความเข้มข้นของยูเรียที่เหมาะสมสำหรับ denatured gel คือ 35% ถึง 55% ซึ่งการเตรียมเจล 8% polyacrylamide ที่มี 35%-55% urea denaturant ทำได้โดยการผสมสารละลาย 0% denaturing solution (40% acrylamide 20 มล. และ 50X TAE buffer 2 มล. เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 100 มล.) เข้ากับสารละลาย 100% denaturing solution (40%

acrylamind 20 มล. 50X TAE buffer 2 มล. Formamind 40 มล. และยูเรีย 42 กรัม เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 100 มล.) เพื่อนำมาใช้เตรียม 35% denaturing solution (0% denaturing solution 9.1 มล. ผสมกับ 100% denaturing solution 4.9 มล.) และใช้เตรียม 55% denaturing solution (0% denaturing solution 6.3 มล. ผสมกับ 100% denaturing solution 7.7 มล. และเติม Dcode dye solution 100 ไมโครลิตร)

- การทำเกรเดียนท์ของโพลีอะคริลาไมล์เจล

ประกอบชุดเกรเดียนท์เพื่อทำแผ่นเจลสำหรับ DGGE นำ 35% denaturing polyacrylamide solution และ 55% denaturing polyacrylamide solution มาเติม 10% ammonium persulfate (ammonium persulfate 0.1 ก. ในน้ำกลั่น 1 มล.) ปริมาตร 90 ไมโครลิตร และเติม TEMED 9 ไมโครลิตร ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เจลเกิดการแข็งตัว ใช้หลอดฉีดยาดูด denaturing polyacrylamind solution ทั้งสองชนิดมาต่อเข้ากับอุปกรณ์การเตรียมเกรเดียนท์ จากนั้นหมุนวงล้อเพื่อให้เครื่องมือทำการผสม denaturing polyacrylamind solution ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันในสัดส่วนตั้งแต่ 0-100% ซึ่งจะทำให้เกิดอะคริลาไมล์เจลที่มีความเข้มข้นของ urea denaturant ตั้งแต่ 35-55% จากนั้นเสียบหัวสำหรับเตรียมร่องบรรจุดีเอ็นเอแล้วทิ้งไว้ 5 ชม. เพื่อให้เจลแข็งตัวพอดี

- การแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้าบนเกรเดียนท์เจล

นำชุดกระจกเจลประกอบเข้ากับเครื่องแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้า ดึงหัวออกแล้วเติม 1X TAE buffer ปริมาตร 7 ลิตร ลงในถังของระบบแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้า เดินเครื่องปั๊มหมุนเวียนบัฟเฟอร์ และตัวทำความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิของบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้นถึง 60 °ซ จึงทำการเติมตัวอย่าง 16S rDNA ลงในเจลโดยใช้  $\phi$ X174 DNA Ladder เป็นดีเอ็นเอมาตรฐาน เริ่มเดินเครื่องแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้า (BIO RAD DCode) โดยใช้อุณหภูมิ 60 °ซ แรงดันไฟฟ้า 75 โวลท์ เป็นเวลาประมาณ 16 ชม. จากนั้นนำเจลออกจากกระจกและนำมาข้อมสีด้วยซิลเวอร์ (Bioneer, Korea) เป็นเวลา 2 ชม.

- การข้อมสีเจลด้วยวิธีซิลเวอร์

การเตรียมกระจก

ทำความสะอาดกระจกด้วยน้ำอุ่นและน้ำยาล้างกระจก จากนั้นล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น แล้วเช็ดให้สะอาดด้วย 70% เอทานอล เตรียมกระจกแผ่นสั้นด้วยการหยด binding solution ปริมาตร 0.5 มล. แล้วเช็ดให้ทั่วโดยใช้ถุงมือ ทิ้งไว้ 4-5 นาที แล้วหยด 70% etanol ปริมาตร 0.5 มล. แล้วเช็ดอีกครั้งด้วยกระดาษซับไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นวางกระจกตั้งฉากในทิศทางเดียวกับที่เช็ดในครั้งแรก สำหรับการเตรียมกระจกแผ่นยาวโดยหยด Glass coat solution ปริมาตร 0.5 มล แล้วเช็ดให้ทั่ว

โดยใช้ถุงมือ ทิ้งไว้ 5-10 นาที เช็ดอีกครั้งด้วยกระดาษซับ จากนั้นนำกระจกมาใช้ในการย้อมเจล ด้วยสารละลายดังแสดงในตารางที่ 3.8

### ขั้นตอนการย้อมสี

แยกกระจกออกจากกันโดยเจลจะติดอยู่กับกระจกแผ่นสั้น จากนั้น Fix gel โดยการวางกระจกสั้นลงในถาด และเท fix/stop solution ลงให้ท่วมแผ่นเจลเขย่าเป็นเวลา 30 นาที ทำการ Enhance gel โดยการแช่ลงใน enhance gel solution แล้วเขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างเจลให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง ครั้งละประมาณ 3 นาที แล้วทำการย้อมสีโดยการแช่เจลลงใน staining solution เขย่าเป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างรอเจลให้เตรียม developing solution เมื่อเขย่าเสร็จแล้ว นำเจลมาล้างในน้ำกลั่น 5 วินาที แล้วนำมาแช่ลงใน chilled developing solution โดยเขย่าเจลนาน 2-3 นาที ซึ่งจะเริ่มเห็นแถบดีเอ็นเอเกิดขึ้น จากนั้นเท fix/stop solution แล้วเขย่าประมาณ 4-5 นาที แล้วทำการล้างเจลอีกครั้งโดยการแช่เจลลงในน้ำกลั่นเป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการฟุ้งเจลให้แห้งโดยวางเจลไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.8 สารละลายที่ใช้ในการย้อมเจลและขั้นตอนการเตรียม

สารละลาย	ขั้นตอนการเตรียม
Fix/stop solution (10% glacial acetic acid)	Glacial acetic acid 75 มล. ในน้ำกลั่น 675 มล.
Enhancing solution (0.1%)	Stock enhancing solution 1.25 มล. ในน้ำกลั่น 749.25 มล.
Staining solution	ซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) 1.25 กรัม ในน้ำกลั่น 750 มล. และเติม 37% Formaldehyde 1.25 มล.
Developing solution	โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ในน้ำกลั่น 1000 มล. แล้วแช่ในตู้เย็น อุณหภูมิ 4°C โดยก่อนใช้ต้องเติม 37% Formaldehyde 2.5 มล. และ โซเดียมไทโอซัลเฟต (10 มก./มล.) 300 มล.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหิวเชื้อจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิงที่ตรึงอยู่บนตัวกลางพลาสติก เพื่อการคัดแยกหิวเชื้อที่มีไนตริไฟอิงแบคทีเรียประสิทธิภาพสูงจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆที่มีค่าความเค็มอยู่ในช่วง 20-30 พีเอสยู จาก 4 แหล่งได้แก่ (1) ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งแบบความหนาแน่นสูงของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2) ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (3) บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งของบรรจงฟาร์ม อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา และ (4) บ่อดินเลี้ยงหอยหวานของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการเพาะเลี้ยงหอยหวาน สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดเพชรบุรี โดยการนำตัวกลางพลาสติกไปแช่ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มต่างๆข้างต้นเป็นระยะเวลา 45 วัน ก่อนนำกลับมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์แอมโมเนียของแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (AOB) บนตัวกลางที่ตรึงหิวเชื้อจากแหล่งต่างๆด้วยวิธีการตรวจสอบการลดลงของแอมโมเนียและการเพิ่มขึ้นของไนเตรต

##### 4.1.1 การตรึงและคัดเลือกหิวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ

จากการแช่ตัวกลางพลาสติกหิวเชื้อแล้วในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มทั้ง 4 แหล่งเป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่าบนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหิวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแต่ละแหล่งมีลักษณะต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยตัวกรองที่ตรึงหิวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะสังเกตเห็นว่ามีชั้นฟิล์มที่บางจนแทบจะมองไม่เห็นเคลือบอยู่บนผิวของวัสดุตัวกรอง คล้ายคลึงกับตัวกรองที่ตรึงหิวเชื้อจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มีชั้นฟิล์มบางๆเคลือบอยู่บนผิวของตัวกรองผสมกับทรายละเอียดที่เกาะอยู่รอบๆตัวกรอง อาจเนื่องมาจากในถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลา

ทะเลมีทรายละเอียดอยู่ในถังเป็นจำนวนมาก ประกอบกับการหมุนเวียนของน้ำและการเติมอากาศ ทำให้ทรายละเอียดฟุ้งกระจายมาเกาะอยู่บนผิวของตัวกรองได้ ส่วนตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จ.ฉะเชิงเทรา และบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จ.เพชรบุรี พบว่ามีสิ่งมีชีวิตมายึดเกาะที่ผิวตัวกรองจำนวนมาก โดยเฉพาะตัวกรองที่แช่ในบ่อเลี้ยงกุ้ง จ.ฉะเชิงเทรา ซึ่งนอกจากมีสาหร่ายแล้วยังมีสัตว์กลุ่มหอนท้อและสัตว์ในกลุ่มซีเลนเทอเรต (Coelenterate) ซึ่งเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในกลุ่มแมงกะพรุนและปะการังอาศัยยึดติดอยู่



(ก) CU



(ข) BUU



(ค) S



(ง) P

รูปที่ 4.1 ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อในถังไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆเป็นเวลา 45 วัน โดย

(ก) ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [CU]

(ข) ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับเลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา [BUU]

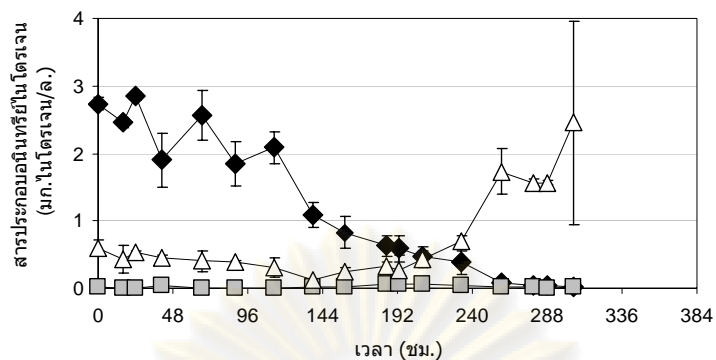
(ค) ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จังหวัดฉะเชิงเทรา [S]

(ง) ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี [P]

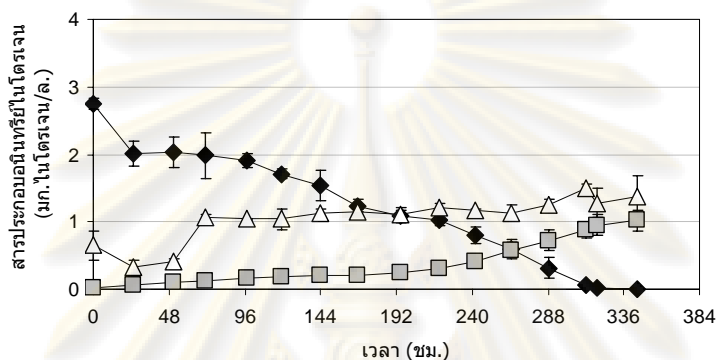
จากการทดสอบประสิทธิภาพหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคที่เรียที่ตรึงอยู่บนตัวกรองชีวภาพจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆในการบำบัดแอมโมเนียในห้องปฏิบัติการ ณ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรต์ของ AOB ผลการทดลองพบว่า อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก CU และ BUU เกิดขึ้นอย่างชัดเจนมีผลทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก CU มีความเข้มข้นของไนไตรต์น้อยกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ตลอดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของไนเตรตเพิ่มขึ้นและเมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นของไนเตรตสูงขึ้นไปถึง 2.45 มก.ไนโตรเจน/ล. (รูปที่ 4.2 ก.) ส่วนตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก BUU พบว่าเกิดการสะสมของไนไตรต์ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นของไนไตรต์สูงถึง 1.02 มก.ไนโตรเจน/ล. และความเข้มข้นของไนเตรตเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 72 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.06 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นความเข้มข้นของไนเตรตค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง (รูปที่ 4.2 ข.) ในขณะที่ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก S และ P พบว่ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นในช่วง 72 ชม. แรกของการทดลอง จากนั้นความเข้มข้นของแอมโมเนียจึงค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค. และ ง. ตามลำดับ



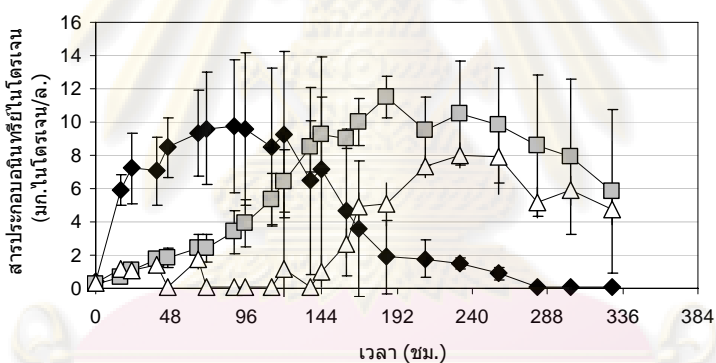
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



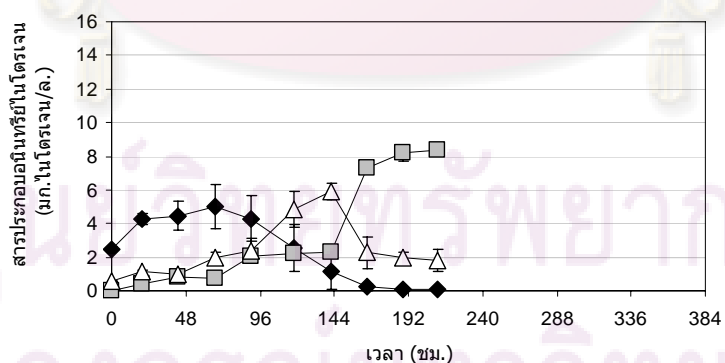
(ก) CU



(ข) BUU



(ค) S



(ง) P

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน โดยตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มของจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) ฉะเชิงเทรา (S) และ เพชรบุรี (P) โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (■) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียจาก CU มีผลทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของไนเตรตเพิ่มขึ้นและไม่พบการสะสมของไนไตรต์ ขณะที่ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก BUU เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากพบการสะสมของไนไตรต์ในระบบ ส่วนตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก S และ P ไม่สามารถตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียได้ เนื่องจากการที่มีสิ่งมีชีวิตอื่นๆปะปนอยู่อย่างมาบบนผิวของตัวกรอง ทำให้ส่งผลกระทบต่ออัตราการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยจะพบการปลดปล่อยแอมโมเนียที่เป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และซากสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในน้ำในช่วง 72 ชม. แรกของการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ตรวจพบน่าจะเป็นผลร่วมกันระหว่างกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน กระบวนการไนตริฟิเคชัน กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน และการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของสิ่งมีชีวิตต่างๆที่อยู่บนตัวกรอง ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสามารถคัดเลือกหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียได้จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม 2 แห่ง คือ ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) และถึงบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) ส่วนการคัดแยกหัวเชื้อจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในจ.ฉะเชิงเทราและเพชรบุรี ได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการตรึงหัวเชื้อและแสดงผลการทดลองในหัวข้อ (4.1.3)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียจาก 4 แห่ง แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าพารามิเตอร์จากทุกแห่งมีค่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในช่วง 4.58-5.37 มก./ล. ซึ่งเหมาะสมต่อการอาศัยและเติบโตของไนโตรไฟอิงแบคทีเรีย สอดคล้องกับรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ที่กล่าวว่าไนโตรไฟอิงแบคทีเรียจะไม่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียได้ที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่า 2 มก./ล. ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อตัวกรองไนตริฟิเคชันจะอยู่ในช่วง 6-9 แต่ค่าต่ำสุดที่มีผลทำให้ *Nitrosomonas spp.* และ *Nitrobacter spp.* ทำงานได้ดีมีค่าระหว่าง 6.5-7.0 (Lawson, 1995) โดยจากการทดลองนี้น้ำจากถังปฏิกรณ์ต่างๆมีความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.74-7.52 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการทำงานของทั้ง AOB และ NOB นอกจากนี้ Timmons และ Losordo (1994) รายงานไว้ว่าตัวกรองไนตริฟิเคชันสามารถทำงานได้ในช่วงความเค็มที่กว้างตั้งแต่ น้ำจืดจนถึงน้ำเค็มโดยมีค่าความเค็มเท่ากับ 40 พีเอสยู จากการทดลองนี้น้ำในถังปฏิกรณ์มีค่าความเค็มอยู่ในช่วง 31-34 พีเอสยู จึงไม่เป็นปัญหาต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ และสำหรับอุณหภูมิของน้ำซึ่งในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 26.90-28.25°ซ เป็นช่วงค่าอุณหภูมิที่อัตราการบำบัดแอมโมเนียสามารถเกิดขึ้นได้ โดย Hagopian และ Riley (1998) รายงานไว้ว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิในช่วง 7-35°ซ และอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมที่สุดต่อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียคือ 25°ซ

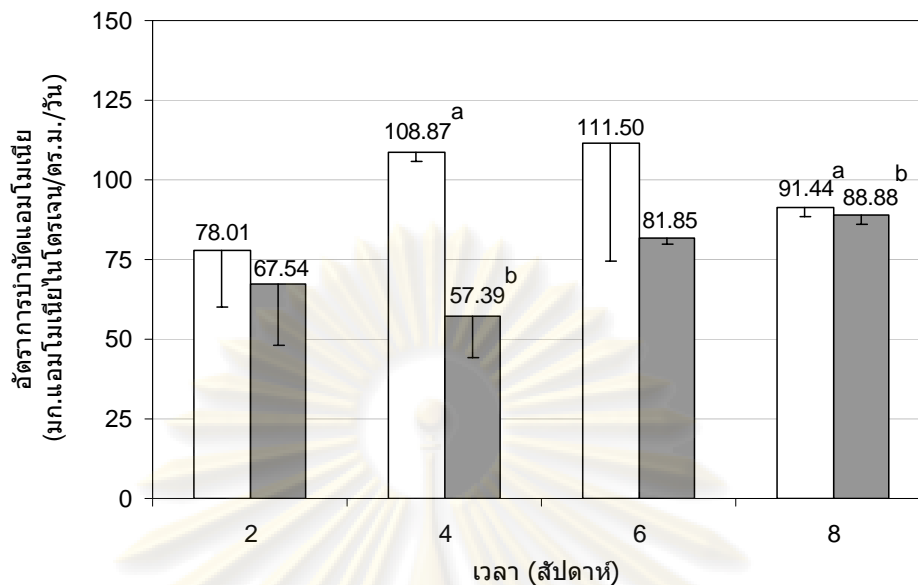
ตารางที่ 4.1 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งต่างๆ

พารามิเตอร์ของน้ำ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)			
	CU	BUU	S	P
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	5.37 $\pm$ 0.42 (5.00-5.90)	4.85 $\pm$ 0.23 (4.60-5.20)	4.58 $\pm$ 1.07 (2.70-5.40)	5.25 $\pm$ 0.42 (4.60-5.60)
ความเป็นกรด-ด่าง	7.43 $\pm$ 0.01 (7.41-7.44)	7.52 $\pm$ 0.07 (7.43-7.60)	6.74 $\pm$ 0.09 (6.56-6.81)	7.29 $\pm$ 0.02 (7.26-7.32)
ความเค็ม (พีเอสยู)	33.33 $\pm$ 3.44 (30.00-39.00)	34.67 $\pm$ 2.88 (32.00-40.00)	31.00 $\pm$ 2.76 (29.00-35.00)	33.17 $\pm$ 1.83 (30.00-35.00)
อุณหภูมิ ( $^{\circ}$ ซ)	26.90 $\pm$ 0.11 (26.80-27.00)	28.25 $\pm$ 0.27 (28.00-28.50)	27.80 $\pm$ 0.77 (27.10-28.50)	28.25 $\pm$ 0.27 (28.00-28.50)

#### 4.1.2 ผลการเหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพไนตริไฟิเคชันโดยใช้หัวเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้

เมื่อนำตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟิเคชันแบคทีเรียที่คัดเลือกได้จากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม 2 แหล่ง คือ ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) และถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) มาขยายเพิ่มจำนวนบนตัวกลางพลาสติกใหม่ในห้องปฏิบัติการ และได้สุ่มตัวอย่างตัวกรองชีวภาพมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียทุกๆ 2 สัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 2 เดือน ผลการตรวจวัดพบว่าตัวกรองชีวภาพ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยอยู่ในช่วง 78-111 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนตัวกรองชีวภาพ BUU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยอยู่ในช่วง 57-108 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน โดยในสัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 8 ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อ BUU อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

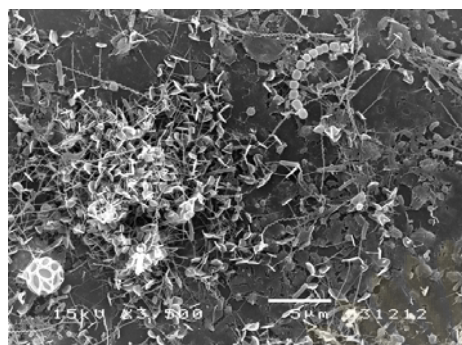
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



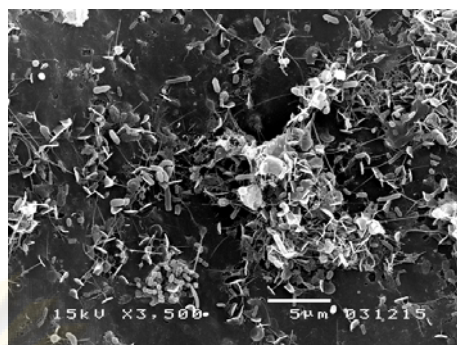
รูปที่ 4.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพใหม่ที่เหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพไนตริฟิเคชันจากหัวเชื้อที่ตรึงได้จากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU [□]) และถึงบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU [■]) โดยตัวอักษร a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ของข้อมูลในสัปดาห์เดียวกัน

จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากทั้ง 2 แหล่ง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการตรึงหัวเชื้อ เนื่องจากไนตริไฟอิงแบคทีเรียมีผลผลิตเซลล์ (Cell yield) ที่ต่ำและต้องใช้เวลาถึง 10-12 ชม. ในการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็นสองเท่า (Lawson, 1995) โดยแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas spp.* เป็นกลุ่มหลักที่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรต์ (Wheaton, 1977) ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 10-14 วัน ในการเติบโตและเพิ่มจำนวนจนสามารถที่จะออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรต์ได้ (Lawson, 1995) โดย Chen และคณะ (1998) กล่าวว่า การตรึงและการเพิ่มจำนวนไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพนั้นต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการเติบโตและความหนาแน่นของแบคทีเรียบนตัวกรอง นั่นคือระยะเวลาในการตรึงหัวเชื้อที่นานขึ้นจึงทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ยึดติดอยู่บนผิวของตัวกรองชีวภาพเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้ตัวกรองชีวภาพมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้นด้วย

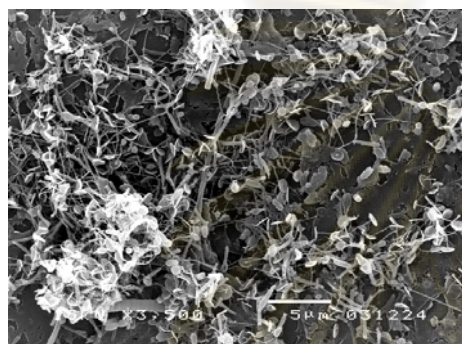
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



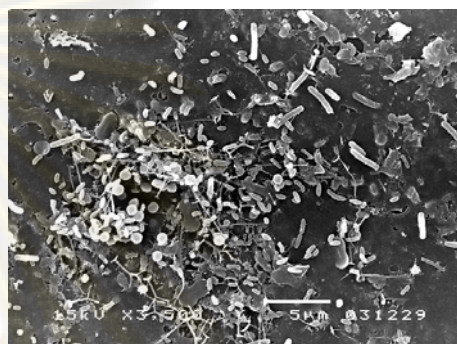
CU สัปดาห์ที่ 2



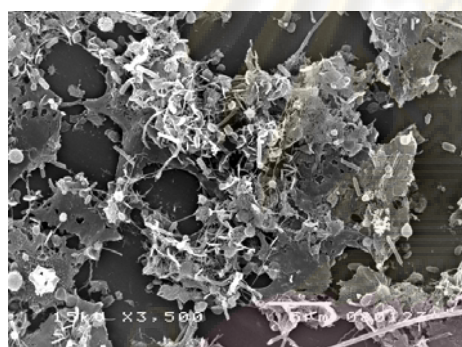
BUU สัปดาห์ที่ 2



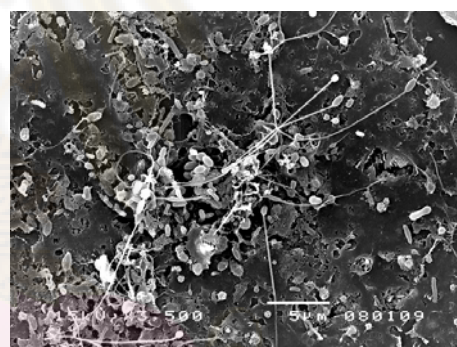
CU สัปดาห์ที่ 4



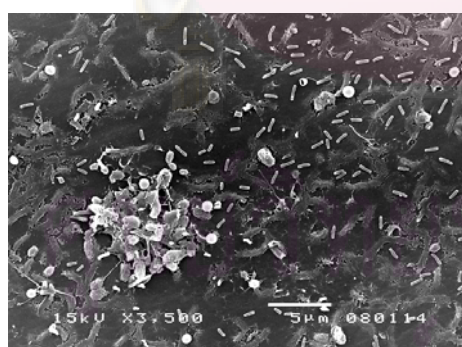
BUU สัปดาห์ที่ 4



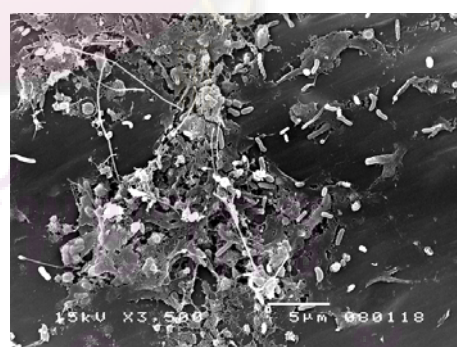
CU สัปดาห์ที่ 6



BUU สัปดาห์ที่ 6



CU สัปดาห์ที่ 8



BUU สัปดาห์ที่ 8

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพภายหลังการเหนี่ยวนำให้เกิดการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่คัดแยกจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) และถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) ทุกๆ 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 2 เดือน (กำลังขยาย 3500 เท่า)



เมื่อทำการตรวจสอบการเกิดฟิล์มชีวภาพบนผิวตัวกรองใหม่โดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าแบคทีเรียบนผิวพลาสติกของตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก CU ในสัปดาห์ที่ 2 และ 4 มีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยพบแบคทีเรียรูปท่อน (Rod) และเส้นใย (Filamentous) เกาะกันเป็นกลุ่มและมีจำนวนมาก โดยจะสังเกตเห็นว่าชั้นของฟิล์มชีวภาพจะมีความหนาขึ้นและในสัปดาห์ที่ 6 และ 8 แบคทีเรียที่มองเห็นรูปร่างของเซลล์ได้ชัดเจนมีจำนวนน้อยลง โดยเฉพาะในสัปดาห์ที่ 8 พบว่าเกิดชั้นฟิล์มหนาเคลือบจนไม่เห็นผิวของพลาสติกและพบแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวด้านนอกของฟิล์มชีวภาพ ส่วนตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก BUU พบว่าแบคทีเรียที่เกาะยึดอยู่บนผิวของตัวกรองมีลักษณะเป็นเส้นใยและรูปท่อนกระจายอยู่ทั่วบนผิวของตัวกรองคล้ายกับ CU โดยในสัปดาห์ที่ 2 จะสังเกตเห็นจำนวนของแบคทีเรียเกาะยึดอยู่เป็นจำนวนมาก และพบชั้นฟิล์มหนาเคลือบอยู่บนผิวของพลาสติกโดยมีบางส่วนของฟิล์มที่หลุดลอกเป็นแผ่นเล็กๆ นั่นคือผลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจากทั้ง 2 แหล่งมีลักษณะของกลุ่มแบคทีเรียที่เกาะยึดอยู่บนผิวของตัวกรองคล้ายกัน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของฟิล์มแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพในตรีฟิเคชันนี้มีความบางมากจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

#### 4.1.3 การตรึงและคัดเลือกหัวเชื้อในตรีฟิอิงแบคทีเรียในห้องปฏิบัติการโดยใช้น้ำตัวอย่างจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม

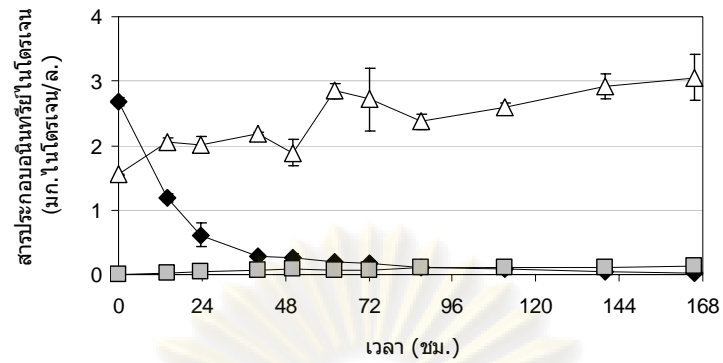
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งพบว่าไม่สามารถตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อในตรีฟิอิงแบคทีเรียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำใน จ.ระยอง (S) และเพชรบุรี (P) ได้ เนื่องจากวิธีการตรึงหัวเชื้อแบคทีเรียไม่เหมาะสมทำให้มีสิ่งมีชีวิตต่างๆ มาเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกรองเป็นจำนวนมาก ส่งผลรบกวนต่อการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีการตรึงหัวเชื้อในตรีฟิอิงแบคทีเรีย โดยการนำน้ำตัวอย่างและตะกอนดินจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มกลางแจ้งทั้ง 2 แหล่ง มาเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นเพื่อทำการตรึงในตรีฟิอิงแบคทีเรียในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียกับตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก CU ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงกว่าตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก BUU (จากผลการทดลองที่ 4.1.2)

หลังจากนำตัวอย่างน้ำและตะกอนดินจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม 3 แหล่ง ได้แก่ CU, S และ P มาใช้เป็นแหล่งของหัวเชื้อในตรีฟิอิงแบคทีเรียเพื่อทำการตรึงบนตัวกลางพลาสติกในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 45 วัน จากนั้นทำการสุ่มตัวกรองชีวภาพมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากทุกแหล่งสามารถลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำลงได้อย่างชัดเจน โดยตัวกรองชีวภาพ CU สามารถลดความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ

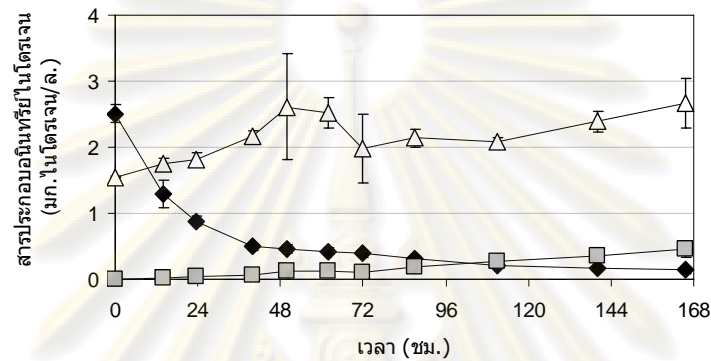
น้อยกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ในเวลาเพียง 24 ชม. ในขณะที่ตัวกรองชีวภาพ S และ P สามารถลดความเข้มข้นของแอมโมเนียลงเหลือน้อยกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ในเวลา 40 และ 72 ชม. ตามลำดับ สำหรับปริมาณไนไตรต์นั้นพบว่าน้ำในถังทดสอบตัวกรองชีวภาพ CU มีไนไตรต์ต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ตลอดการทดลอง ส่วนตัวกรองชีวภาพ S พบการสะสมของไนไตรต์เท่ากับ 0.12 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และตัวกรองชีวภาพ P พบการสะสมไนไตรต์มากที่สุดโดยมีความเข้มข้น 0.80 มก.ไนโตรเจน/ล. ในช่วงเวลาที่ 123 ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองที่กล่าวมาจึงสรุปได้ว่าตัวกรองชีวภาพ CU เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียกลุ่ม AOB และ NOB (Tal และคณะ, 2003) ส่วนตัวกรองชีวภาพ S และ P นั้นกระบวนการไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากยังพบการสะสมของไนไตรต์ในระบบ แสดงว่าแบคทีเรียกลุ่ม AOB สามารถทำงานได้ดีแต่ NOB ยังไม่สามารถทำงานเพื่อบำบัดไนไตรต์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยอาจเนื่องมาจากแบคทีเรียกลุ่ม NOB มีจำนวนน้อยและเติบโตช้ากว่า AOB (Prosser, 1986) จึงต้องการเวลาช่วงหนึ่งในการเพิ่มจำนวนให้มากพอที่จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาการบำบัดเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อนำผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียจากการทดลองครึ่งหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มทั้ง 4 แหล่ง มาแสดงรวมกันในตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ครึ่งหัวเชื้อจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยผลการทดลองหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่าตัวกรองชีวภาพ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $13.60 \pm 0.42$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งสูงกว่าตัวกรองที่ครึ่งหัวเชื้อจาก BUU ที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $9.08 \pm 0.48$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ในขณะที่ตัวกรองที่ครึ่งหัวเชื้อจาก S และ P ไม่สามารถตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียได้ในช่วงแรก เนื่องจากมีสิ่งมีชีวิตอื่นๆปะปนอยู่มากบนผิวของตัวกรอง ทำให้ส่งผลกระทบต่ออัตราการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

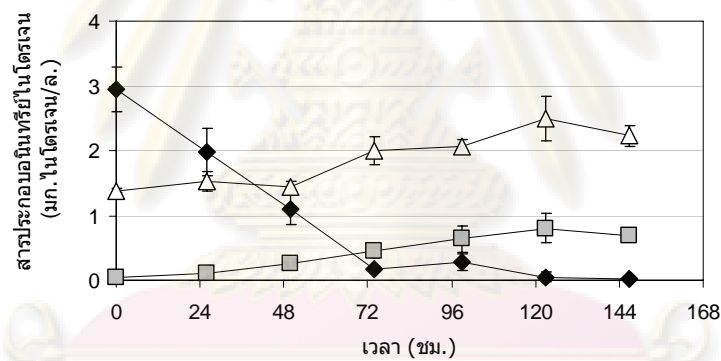
โดยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนวิธีการครึ่งหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียให้มีความเหมาะสมมากขึ้น (ผลการทดลองหัวข้อที่ 4.1.3) ผลการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ  $47.20 \pm 1.86$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนตัวกรองชีวภาพ S มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $39.41 \pm 2.36$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยของตัวกรอง S จะต่ำกว่าตัวกรอง CU อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )



(ก) CU



(ข) S



(ค) P

รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากตัวอย่างน้ำและดินตะกอนในห้องปฏิบัติการ โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อในτριไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ 4 แห่ง จากผลการทดลองหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.3

แหล่งที่ตรึงหัวเชื้อ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน)	
	ครั้งที่ 1 (4.1.1)	ครั้งที่ 2 (4.1.3)
ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยง กุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU)	13.60 $\pm$ 0.42 <sup>b</sup>	47.20 $\pm$ 1.86 <sup>b</sup>
ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU)	9.08 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>	-
บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จ.ฉะเชิงเทรา (S)	ไม่สามารถตรวจวัดได้	39.41 $\pm$ 2.36 <sup>a</sup>
บ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จ.เพชรบุรี (P)	ไม่สามารถตรวจวัดได้	44.92 $\pm$ 5.72 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษร a และ b ในแต่ละคอลัมน์ แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

จากผลการทดลองที่ 4.1.1 และ 4.1.3 สามารถสรุปได้ว่าตัวกรองชีวภาพ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงที่สุด ส่วนการวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในการทดลองที่ 4.1.3 มีอัตราสูงกว่าผลการทดลองที่ 4.1.1 เนื่องจากวิธีการตรึงหัวเชื้อในตรีไฟอิงแบคทีเรียมีความเหมาะสมมากกว่า โดยในระหว่างการตรึงหัวเชื้อในห้องปฏิบัติการได้มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. และโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 100-150 มก./ล โดยได้รับการรักษาความเข้มข้นให้มีค่าที่เหมาะสมตลอดการทดลอง เนื่องจากแอมโมเนียมคลอไรด์มีไนโตรเจนที่เป็นแหล่งพลังงานสำหรับในตรีไฟอิงแบคทีเรีย ส่วนโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งของคาร์บอนเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ของในตรีไฟอิงแบคทีเรีย (Timmons และ Losordo, 1994) และยังช่วยในการรักษาค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำ เนื่องจากกระบวนการในตรีไฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ผลิตกรด (Wheaton, 1977) การเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำได้

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในตารางที่ 4.3 มีค่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในช่วง 4.87-5.43 มก./ล. ความเป็นกรด-ด่างของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 6.77-7.43 ค่าสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วง 76.67-106.67 มก./ล. ความเค็มมีค่าอยู่ในช่วง 29.33-32.67 พีเอสยู ส่วนอุณหภูมิของน้ำในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 26.93-28.33 ซึ่งทุกพารามิเตอร์มีความเหมาะสมต่อการเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

อัตราการบำบัดแอมโมเนียของหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเต็มแบบต่างๆ จากงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยของ Tseng และ Wu (2004) ซึ่งรายงานว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับเลี้ยงปลาไหลมีค่าระหว่าง 10-70 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน แต่ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อจาก CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ Silapakul และคณะ (2005) ที่ใช้หัวเชื้อจากแหล่งเดียวกันแต่ทำการตรึงบนตัวกลางพลาสติกชนิดไบโอบอลและบรรจุในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Airlift Bioreactor) ซึ่งรายงานว่ามีค่าระหว่าง 140-870 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการตรึงหัวเชื้อ 45 วัน ทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียมีการเติบโตเกาะติดกับผิวตัวกลางพลาสติกและสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ แต่อัตราการบำบัดยังมีค่าต่ำอาจเป็นผลมาจากระยะเวลาการตรึงหัวเชื้อของงานวิจัยนี้ยังไม่เพียงพอทำให้ปริมาณแบคทีเรียบนผิวของตัวกรองยังคงมีปริมาณน้อย โดยงานวิจัยของ Grommen และคณะ (2002) รายงานว่าระยะเวลาในการเตรียมตัวกรองไนตริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต้องใช้เวลา 28-60 วัน

จากผลการทดลองในช่วงนี้ได้ทำการคัดเลือกแหล่งของหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งตัวกรองชีวภาพ CU มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงที่สุดมาทำการศึกษาผลของความเข้มข้นแอมโมเนียต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ ในระยะการเตรียมสภาพและการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพระยะยาวในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งการนำตัวกรองชีวภาพไปทดลองใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะการเลี้ยงกุ้งในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งต่อไป

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ที่ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์ของน้ำ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)		
	CU	S	P
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	5.37 $\pm$ 0.47 (5.00-5.90)	4.87 $\pm$ 0.84 (3.90-5.40)	5.43 $\pm$ 0.29 (5.10-5.60)
ความเป็นกรด-ด่าง	7.43 $\pm$ 0.02 (7.41-7.44)	6.77 $\pm$ 0.04 (6.73-6.81)	7.28 $\pm$ 0.02 (7.26-7.29)
ความเป็นด่าง (มก./ล.)	106.67 $\pm$ 5.77 (100-110)	76.67 $\pm$ 5.77 (70-80)	103.33 $\pm$ 11.55 (90-110)
ความเค็ม (พีเอสยู)	32.00 $\pm$ 2.00 (30.00-34.00)	29.33 $\pm$ 0.58 (29.00-30.00)	32.67 $\pm$ 2.31 (30.00-34.00)
อุณหภูมิ ( $^{\circ}$ ซ)	26.93 $\pm$ 0.12 (26.80-27.00)	27.57 $\pm$ 0.81 (27.10-28.50)	28.33 $\pm$ 0.29 (28.00-28.50)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาตัวกรองชีวภาพระยะยาว

การทดลองนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการไน-  
 ตรีฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ โดยการบ่มตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียที่ระดับความ  
 เข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน ได้แก่ ความเข้มข้น 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเลี้ยงหัว  
 เชื้อเป็นระยะเวลา 3-6 เดือน โดยหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวกรองที่ตรึง  
 จากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) ซึ่งให้  
 ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ผ่านมา

### 4.2.1 ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนภายในถังปฏิกรณ์ที่ทำการบ่ม ตัวกรองชีวภาพไนโตรฟิเคชัน

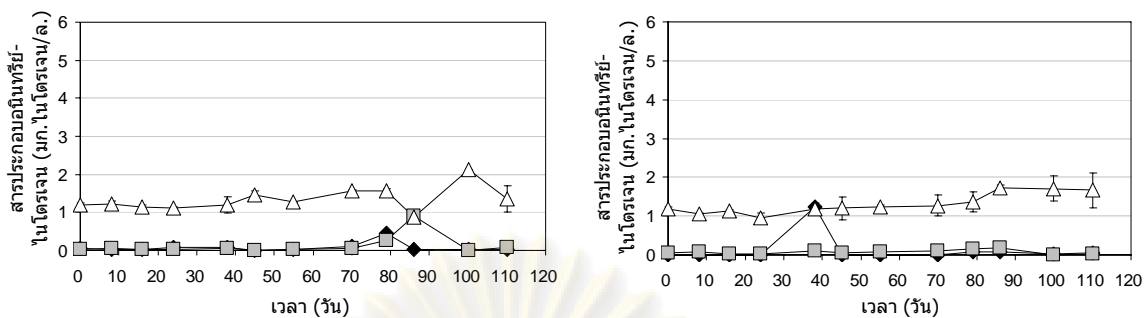
การทดลองนี้เป็นการทดลองบ่มหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียระยะยาวในถังปฏิกรณ์ ซึ่งได้  
 มีการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังเก็บน้ำก่อน  
 เข้าสู่ถังปฏิกรณ์และน้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์ที่มีการบ่มตัวกรองชีวภาพ ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือ  
 ลดลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจะใช้อธิบายกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ได้

จากตารางที่ 4.4 แสดงคุณภาพน้ำที่เก็บตัวอย่างจากถังปฏิกรณ์ที่ทำการบ่มตัวกรองชีวภาพ  
 ที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำในถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรอง  
 ชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการบ่มตัวกรองไนโตรฟิเคชัน ยกเว้น  
 ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มีค่าแตกต่างกันตามที่ได้กำหนดไว้ในแผนการทดลอง โดยในชุดการ  
 ทดลองที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล. นั้นผลการตรวจวัดแอมโมเนียเฉลี่ย  
 ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ  $0.07 \pm 0.01$  มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งการตรวจพบแอมโมเนียปริมาณน้อย  
 นี้มาจากแอมโมเนียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยน้ำทะเลดังกล่าวเตรียมขึ้นจาก  
 การผสมน้ำทะเลความเค็มสูงกับน้ำประปาเพื่อปรับค่าความเค็ม สำหรับชุดการทดลองที่กำหนดค่า  
 แอมโมเนีย 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. นั้นมีปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เท่ากับ  
 $0.65 \pm 0.06$ ,  $2.20 \pm 0.16$  และ  $9.29 \pm 0.77$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และยังพบว่าปริมาณแอมโมเนีย  
 ในน้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์นั้นมีค่าลดลงอย่างมากในทุกชุดการทดลอง และพบว่าปริมาณไน  
 เตรตในน้ำที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดกระบวนการไนโตรฟิเคชันขึ้น  
 ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ในระหว่างการทดลอง  
 บ่มตัวกรองชีวภาพแสดงในภาพที่ 4.6 ถึง 4.9

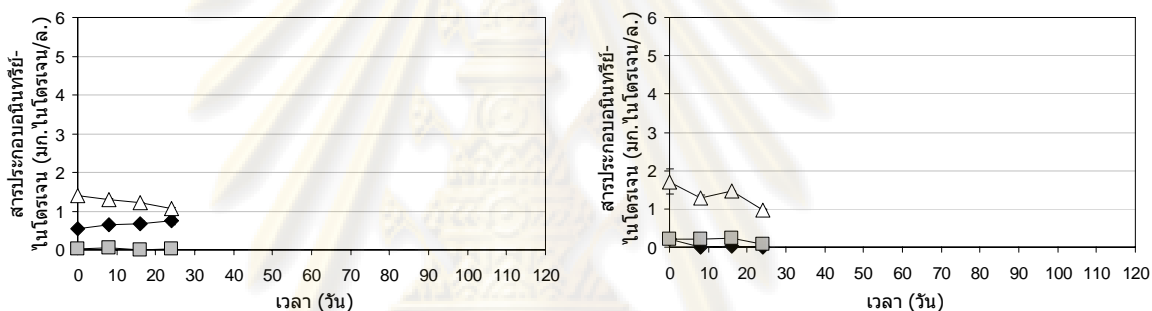
ตารางที่ 4.4 คุณภาพน้ำภายในถึงปฏิกรณ์ที่ทำการบ่มตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)			
	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล.
แอมโมเนีย (เข้า) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.07±0.01 (0.00-0.46)	0.65±0.06 (0.54-0.76)	2.20±0.16 (1.05-3.12)	9.29±0.77 (4.00-11.73)
แอมโมเนีย (ออก) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.12±0.01 (0.00-1.22)	0.06±0.01 (0.00-0.21)	0.08±0.01 (0.00-0.52)	1.68±0.08 (0.02-4.69)
ไนไตรต์ (เข้า) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.12±0.01 (0.01-0.89)	0.02±0.01 (0.01-0.04)	0.39±0.01 (0.01-1.87)	0.33±0.01 (0.02-0.94)
ไนไตรต์ (ออก) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.07±0.01 (0.01-0.17)	0.18±0.02 (0.07-0.24)	0.26±0.01 (0.02-0.77)	3.16±0.49 (0.06-6.18)
ไนเตรต (เข้า) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	1.34±0.08 (0.87-2.11)	1.24±0.02 (1.06-1.39)	1.43±0.06 (0.92-2.60)	1.67±0.09 (0.87-2.71)
ไนเตรต (ออก) (มก.ไนโตรเจน/ล.)	1.30±0.18 (0.95-1.73)	1.35±0.11 (0.97-1.71)	3.08±0.29 (1.89-5.74)	6.56±0.92 (1.87-14.18)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	7.31±0.42 (6.78-8.12)	7.56±0.42 (6.87-8.13)	7.30±0.39 (6.82-8.11)	7.06±0.08 (6.95-7.21)
ความเป็นกรด-ด่าง	7.93±0.32 (7.40-8.66)	8.02±0.34 (7.40-8.63)	7.94±0.30 (7.40-8.66)	7.78±0.40 (7.00-8.29)
ความเป็นด่าง (มก./ล.)	104.78±11.23 (80-120)	108.18±10.79 (100-130)	96.09±15.30 (60-120)	84.17±16.76 (60-110)
ความเค็ม (พีเอสยู)	31.09±1.70 (29.00-35.00)	30.18±1.17 (29.00-33.00)	31.00±1.54 (29.00-35.00)	31.25±0.75 (30.00-32.00)
อุณหภูมิ (°ซ)	25.89±1.25 (24.20-28.80)	26.10±1.35 (24.50-28.70)	25.70±1.23 (24.10-28.60)	25.55±1.02 (24.20-27.70)

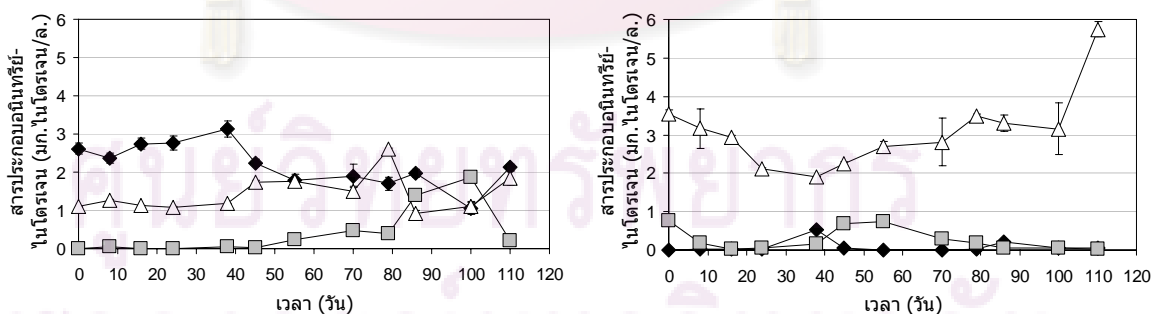




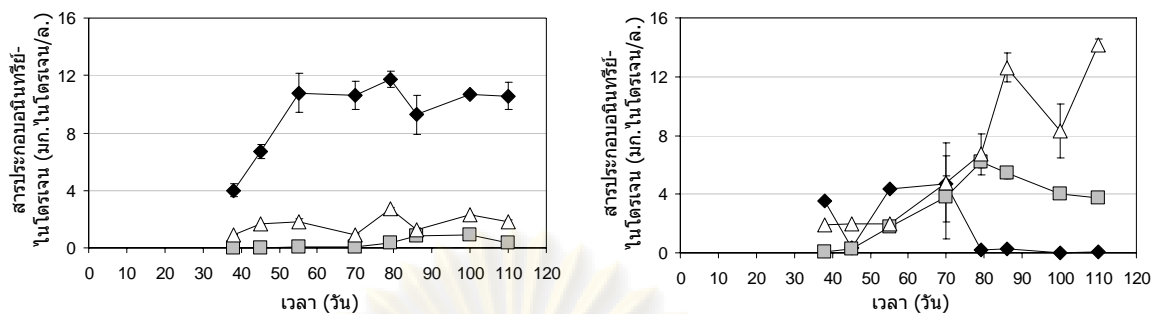
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้า (ซ้าย) และออก (ขวา) จากถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยวันที่ 0 จากกราฟเป็นข้อมูลจากวันที่ 60 ของการทดลอง โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้า (ซ้าย) และออก (ขวา) จากถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยวันที่ 0 จากกราฟเป็นข้อมูลจากวันที่ 60 ของการทดลอง



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้า (ซ้าย) และออก (ขวา) จากถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยวันที่ 0 จากกราฟเป็นข้อมูลจากวันที่ 60 ของการทดลอง



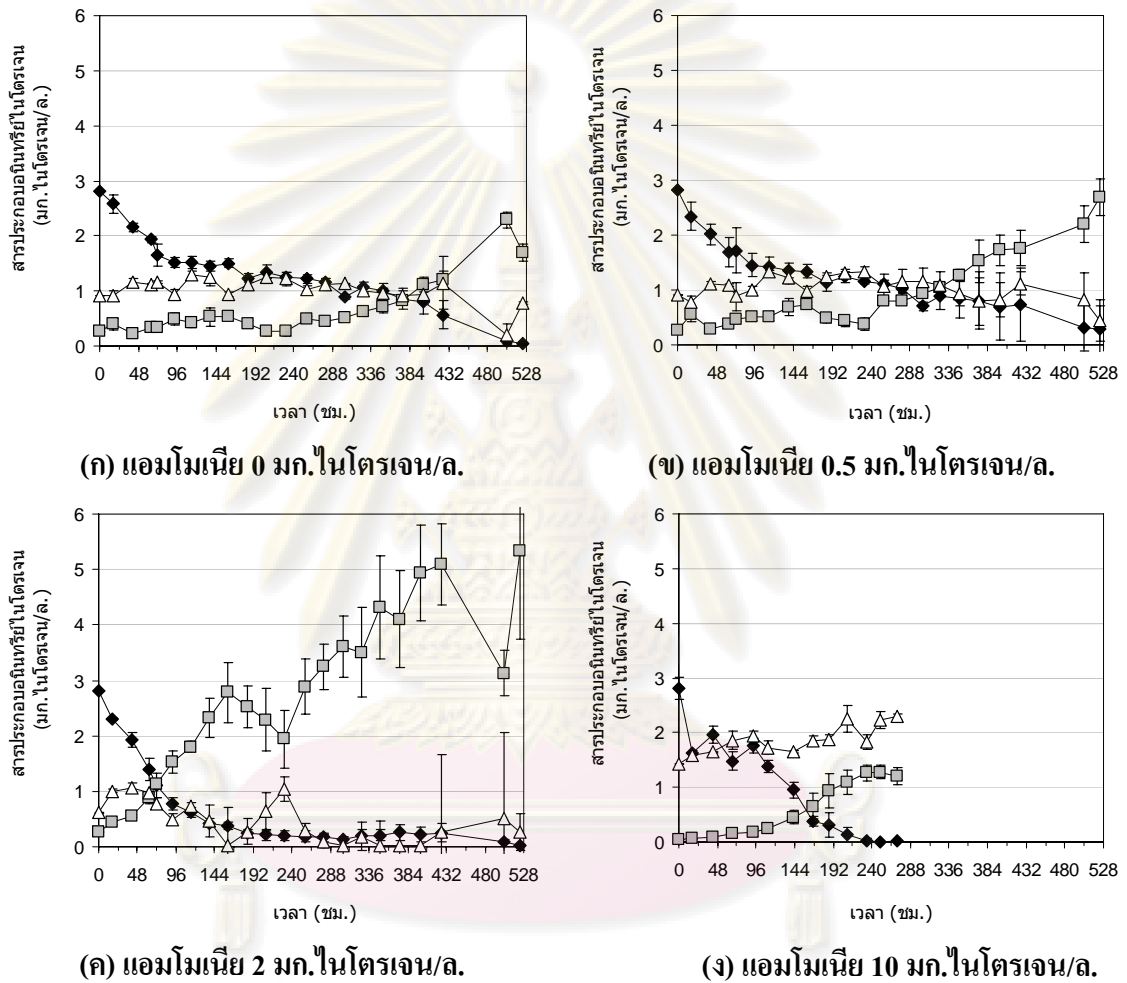
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้า (ซ้าย) และออก (ขวา) จากถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยวันที่ 0 จากกราฟเป็นข้อมูลจากวันที่ 60 ของการทดลอง โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (■) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

#### 4.2.2 การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน

ตามปรกติการเตรียมตัวกรองไนตริไฟเคชันพร้อมใช้งาน จะต้องใช้เวลาในการตั้งหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่น้อยกว่า 30-45 วัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตที่ค่อนข้างต่ำ (Ruiz และคณะ, 2006) และมีปริมาณน้อย รวมถึงการเก็บรักษาสภาพของตัวกรองชีวภาพให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การทดลองใช้ตัวกรองชีวภาพ CU ที่เป็นหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาทดลองขยายและเพิ่มปริมาณหัวเชื้อโดยการบ่มตัวกรองชีวภาพที่สภาวะความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน ได้แก่ ความเข้มข้น 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยได้ทำการลุ่มตัวอย่างตัวกรองชีวภาพที่บ่มในถังปฏิกรณ์แต่ละความเข้มข้นมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียเดือนละ 1 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.10-4.13 และตารางที่ 4.6

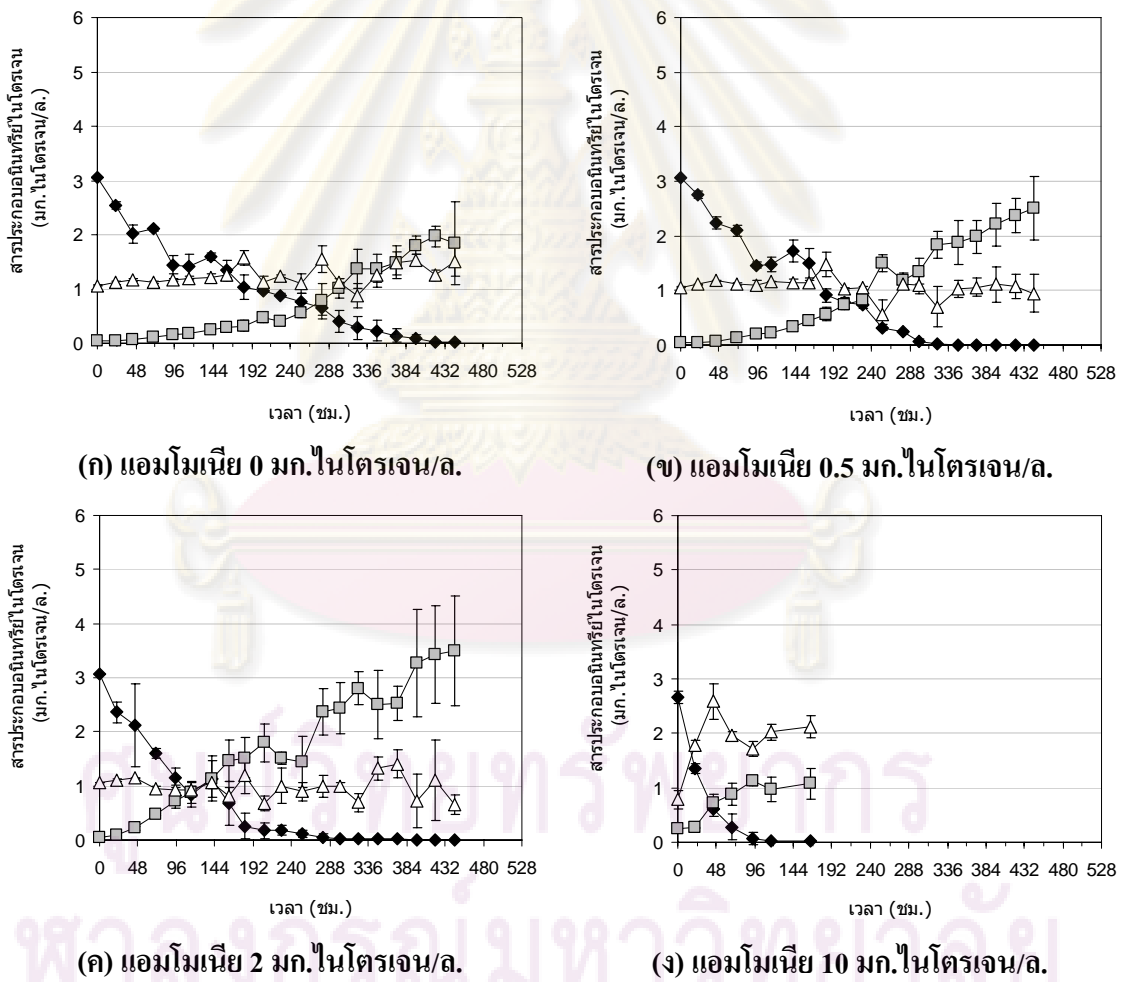
จะเห็นได้ว่าหลังจากทำการบ่มตัวกรองชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างๆ เป็นเวลา 1 เดือน ตัวกรองชีวภาพสามารถลดความเข้มข้นของแอมโมเนียลงได้ในอัตราที่แตกต่างกัน โดยการบ่มตัวกรองที่ความเข้มข้นแอมโมเนียสูงสุด 10 มก.ไนโตรเจน/ล. นั้นจะพบการลดลงของแอมโมเนียเร็วที่สุด (รูปที่ 4.10 ง) โดยตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ใช้เวลาประมาณ 7 วันในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 และ 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ต้องใช้เวลาถึง 20 วัน ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. อย่างไรก็ตาม กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นนั้นยังคงพบการสะสมของไนไตรต์อยู่ภายในถังทดสอบ ซึ่งจากการที่มีไนไตรต์สะสมน่าจะมาจากแบคทีเรียกลุ่ม NOB บนผิวของตัวกรองมีปริมาณน้อย เนื่องจากมีอัตรา

การเติบโตที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแบคทีเรียที่เรียกลุ่ม AOB (Vadivelu และคณะ, 2007) และระยะเวลาในการตรึงหัวเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพเพียง 30 วัน อาจจะยังไม่สามารถทำให้ตัวกรองมีประสิทธิภาพได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ Hart และ O'sullivan (1993) ได้กล่าวว่าสำหรับการตรึงไนโตรไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองต้องใช้เวลา 40-60 วันเพื่อให้เกิดกระบวนการไนโตรฟิเคชันโดยตัวกรองชีวภาพอย่างสมบูรณ์



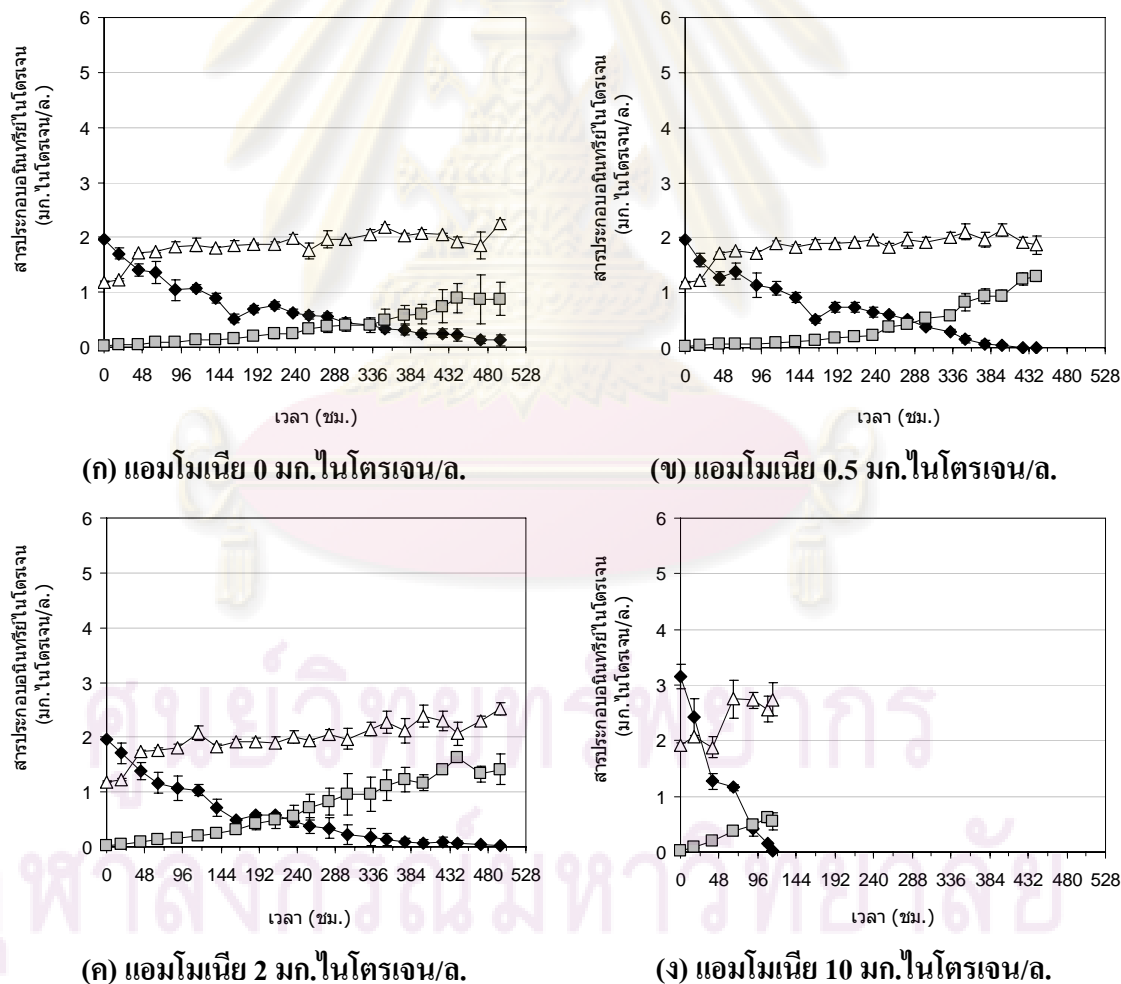
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนโตรฟิเคชันที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 1 เดือน เมื่อสูมนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนเตรต และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

รูปที่ 4.11 เป็นผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากการสู่มหิบบัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ที่ทำการบ่มในความเข้มข้นแอมโมเนียต่างๆ เป็นเวลา 2 เดือน พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองมีแนวโน้มเร็วขึ้นกว่าเดือนที่ 1 (รูปที่ 4.11, ตารางที่ 4.6) โดยตัวกรองที่บ่มด้วยความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. จะแสดงอัตราการบำบัดแอมโมเนียเร็วที่สุดโดยใช้เวลาเพียง 2 วันในการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2, 0.5 และ 0 มก.ไนโตรเจน/ล. ใช้เวลาในการลดลงของแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. เท่ากับ 7 วัน, 10 วัน และ 12 วัน ตามลำดับ โดยตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียทุกความเข้มข้นแสดงการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากพบการสะสมของไนไตรต์และความเข้มข้นของไนเตรตค่อนข้างคงที่ ถึงแม้ว่าจะบ่มตัวกรองมาเป็นเวลา 60 วันแล้วก็ตาม



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 2 เดือน เมื่อสู่มนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

เมื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองที่บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นเวลา 3 เดือน ในระดับแอมโมเนียความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียจากเริ่มต้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ยังพบการลดลงของแอมโมเนียเร็วที่สุด โดยใช้เวลา 3 วันในการลดปริมาณแอมโมเนียลงต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0, 0.5 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งใช้แอมโมเนียเริ่มต้นในการตรวจวัดเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. มีการลดลงของแอมโมเนียโดยใช้เวลา 13 วัน, 12 วัน และ 9 วัน ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของไนไตรต์พบว่าตัวกรองจากทุกความเข้มข้นมีไนไตรต์สะสม และความเข้มข้นของไนเตรตค่อนข้างคงที่ นั่นคือตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียจากทุกความเข้มข้นเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์เช่นเดียวกับผลการทดลองบ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นเวลา 1 และ 2 เดือน



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันเป็นเวลา 3 เดือน เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

รูปที่ 4.13 เป็นผลการบ่มตัวกรองไนตริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ระบบต่อเนื่องที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระยะเวลา 4-6 เดือน ซึ่งเป็นการบ่มตัวกรองไนตริฟิเคชันระยะยาว และยังมีลักษณะคล้ายกับสภาวะที่พบได้กับตัวกรองชีวภาพของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มทั่วไปที่มักจะมีการหยุดการใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่ง ทำให้มีปริมาณแอมโมเนียคั่งค้างในระบบต่ำซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน การทดลองบ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นการทดลองระยะยาว 6 เดือน จากนั้นสุ่มตัวอย่างตัวกรองเดือนละ 1 ครั้ง มาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียเปรียบเทียบกับการบ่มตัวกรองที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งจะเป็นความเข้มข้นสูงสุดของแอมโมเนียที่จะพบในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและได้นำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบในการทดลองนี้

ผลการทดลองพบว่าตัวกรองที่บ่มในถังปฏิกรณ์ที่มีแอมโมเนียต่ำ (ความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียเท่ากับ 0.07 มก.ไนโตรเจน/ล.) ยังคงพบความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียได้ หลังจากบ่มเชื้อเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าตัวกรองชีวภาพที่อยู่ในถังทดสอบจะต้องใช้เวลา 7 วัน ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนในเดือนที่ 5 และ 6 ใช้เวลาประมาณ 4 วัน แต่ในทุกเดือนพบว่ามีการสะสมของไนไตรต์มากกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ขาดแอมโมเนียเป็นเวลานานจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (NOB) มากกว่าแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (AOB) ซึ่งยังสามารถทำงานได้ดีกว่า เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารที่จำกัดการเติบโตของ *Nitrosomonas spp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นของ AOB (Spotte, 1979) ถ้าระบบขาดแอมโมเนียอย่างต่อเนื่องจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม AOB ทำให้ไม่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรต์ได้ ซึ่งไนไตรต์เป็นสารที่จำกัดการเติบโตของ *Nitrobacter spp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นของ NOB จึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของ NOB โดยภาพรวม (Timmons และ Losordo, 1994) ดังนั้นเมื่อสุ่มตัวอย่างตัวกรองมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียจึงพบการลดลงของแอมโมเนียแต่มีการสะสมของไนไตรต์ เพราะว่าเมื่อแอมโมเนียถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรต์แล้ว จากนั้น *Nitrobacter spp.* จะนำไนไตรต์มาใช้เป็นแหล่งของพลังงานสำหรับการเติบโตโดยจะใช้เวลาประมาณ 10 วัน (Lawson, 1995) ซึ่งทำให้แบคทีเรียกลุ่ม NOB เพิ่มจำนวนไม่ทันเป็นผลให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่พบในระบบหมุนเวียนน้ำทั่วไปเมื่อไม่ได้ใช้งานเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการขาดแอมโมเนียและไนไตรต์ ส่งผลให้เมื่อนำมาใช้งานจะเกิดการสะสมของไนไตรต์เนื่องจาก NOB ถูกยับยั้งหรือลดจำนวนลง อย่างไรก็ตามการที่พบว่าตัวกรองชีวภาพที่บ่มในน้ำที่ไม่เติมแอมโมเนียยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียอยู่ได้ ก็เนื่องมาจากการที่น้ำในถังปฏิกรณ์ยังคงมีแอมโมเนียปนอยู่ในปริมาณน้อย 0.07 มก.ไนโตรเจน/ล. และการสุ่มตัวกรองบางส่วนมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังทดสอบที่มีการเติมแอมโมเนียความ

เข้มข้น 3 มก. ในโตรเจน/ล. มีผลทำให้ตัวกรองบางส่วนยังคงได้รับแอมโมเนียอยู่ ส่งผลให้ตัวกรองยังคงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้

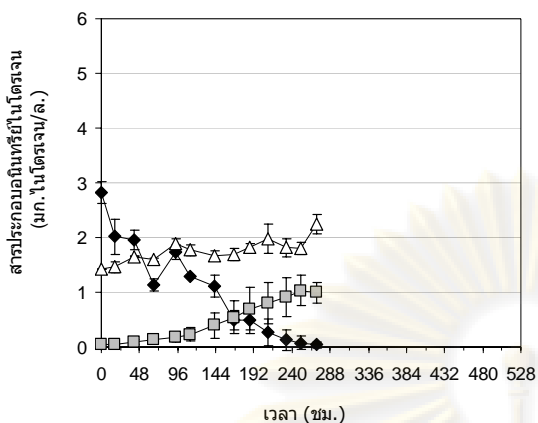
สำหรับตัวกรองไนตริไฟเคชันที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 2 มก. ในโตรเจน/ล. เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าตัวกรองยังมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียได้เป็นอย่างดีในทุกเดือนที่นำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย และพบว่าตัวกรองที่บ่มเข้ามาแล้วเป็นเวลา 5 และ 6 เดือน จะพบไนโตรเจนในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียน้อยกว่า 0.1 มก. ในโตรเจน/ล. และมีการสะสมไนเตรตเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าไนโตรเจนได้ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรต กล่าวได้ว่าการบำบัดที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการไนตริไฟเคชันที่สมบูรณ์

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการบ่มตัวกรองชีวภาพโดยมีการเติมแอมโมเนียเข้ามาในระบบอย่างต่อเนื่อง ทำให้แบคทีเรียกลุ่ม AOB สามารถเติบโตได้และออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรตซึ่งไนเตรตที่เกิดขึ้นนี้จะถูกแบคทีเรียกลุ่ม NOB สามารถนำไปใช้ในการเติบโตได้ แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียกลุ่ม NOB มีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้า (Timmons และ Losordo, 1994) จึงทำให้มีปริมาณน้อย กระบวนการรักษาเชื้อและควบคุมประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวกรองชีวภาพอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อความสำเร็จของระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



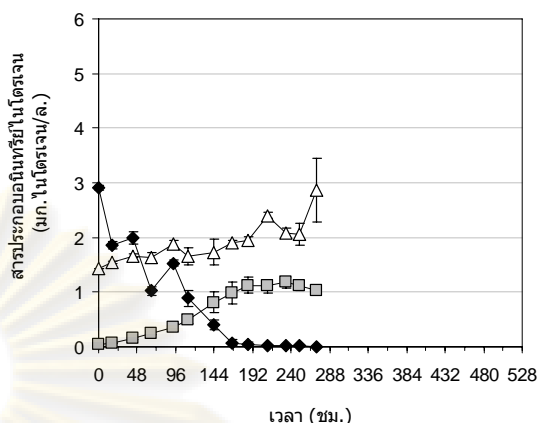
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.

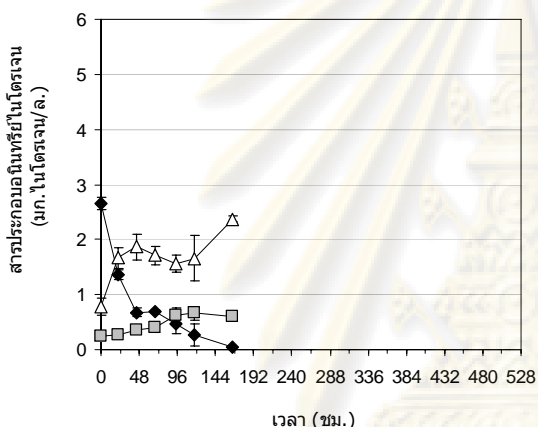


(ก) เดือนที่ 4

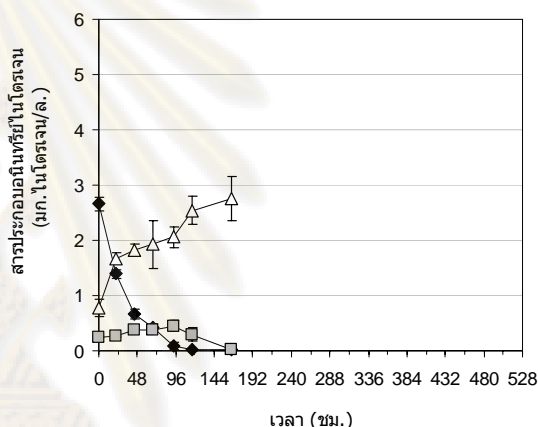
แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



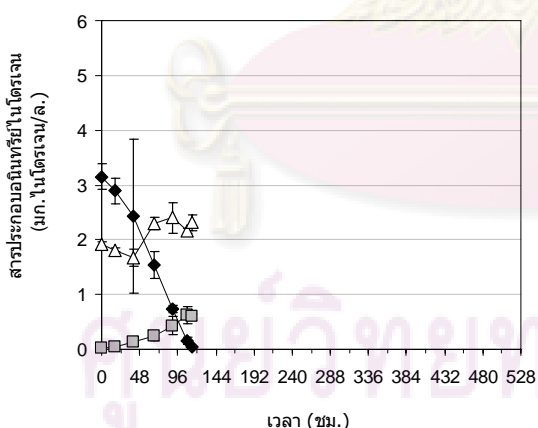
(ข) เดือนที่ 4



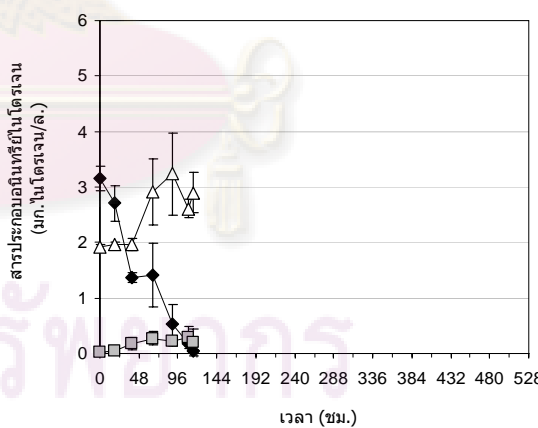
(ค) เดือนที่ 5



(ง) เดือนที่ 5



(จ) เดือนที่ 6



(ฉ) เดือนที่ 6

รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ผ่านการบ่มด้วยความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นระยะเวลา 4-6 เดือน เมื่อสู่นำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต



สำหรับการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำจากถังปฏิกรณ์ตรวจวัด อัตราการบำบัดแอมโมเนียได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 6 เดือน โดยค่าคุณภาพน้ำต่างๆเหล่านี้อยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังที่ Satoh และคณะ (2000) กล่าวว่าพารามิเตอร์ของน้ำ เช่น ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง สภาพความเป็นด่าง และความเค็ม มีผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองไนตริฟิเคชัน ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรตเท่ากับ 4.57 ก.ออกซิเจน/ก.ไนโตรเจน (Tchobanoglous และคณะ, 2004) และจากงานวิจัยของ Grommen และคณะ (2002) ซึ่งใช้ปริมาณออกซิเจนในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียปริมาณออกซิเจนไม่ต่ำกว่า 6 มก./ล. จึงเพียงพอต่อการนำไปใช้ของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย สำหรับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรียคืออยู่ในช่วง 6-9 (Lawson, 1995) แต่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0-7.2 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย (Tchobanoglous และคณะ, 2004) สอดคล้องกับค่าจากการทดลองนี้ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 8 ซึ่งเหมาะสมต่อการอยู่อาศัยของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย แต่อาจจะสูงกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียเล็กน้อย ส่วนค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำจากรายงานของ Soderberg (1995) ที่กล่าวว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดแอมโมเนียที่ค่าสภาพความเป็นด่างอย่างน้อย 75 มก./ล. และ Hart และ O'sullivan (1993) รายงานว่าสภาพความเป็นด่างไม่ควรน้อยกว่า 100 มก./ล. ซึ่งสภาพความเป็นด่างในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 170 มก./ล. จึงเป็นปริมาณที่เพียงพอต่อการตรวจวัด สำหรับความเค็มมีค่าอยู่ในช่วง 32.27-34.57 พีเอสยู ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมตามรายงานของ Timmons และ Losordo (1994) ที่กล่าวว่าความเค็มที่เหมาะสมต่อตัวกรองไนตริฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 0-40 พีเอสยู และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อตัวกรองไนตริฟิเคชันควรมีค่าอยู่ในช่วง 7-35°C (Hagopian และ Riley, 1998) ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดลองนี้มีค่าประมาณ 27°C จึงไม่น่าจะเป็นปัญหาต่อการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 คุณภาพน้ำของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ครึ่งหัวเชื้อจากแอมโมเนียความเข้มข้นต่างๆ

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)			
	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.	ความเข้มข้น แอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล.
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	6.43±0.52 (5.46-7.02)	6.94±0.07 (6.86-7.02)	6.43±0.54 (5.37-7.02)	6.29±0.56 (5.39-6.80)
ความเป็นกรด-ด่าง	8.09±0.33 (7.68-8.53)	8.02±0.39 (7.68-8.45)	8.10±0.34 (7.68-8.58)	8.12±0.32 (7.73-8.57)
ความเป็นด่าง (มก./ล.)	174.09±15.32 (140-200)	158.57±14.64 (140-170)	170.91±17.16 (140-200)	175.00±21.03 (140-200)
ความเค็ม (พีเอสยู)	32.27±4.13 (29.00-46.00)	34.57±6.85 (29.00-45.00)	32.50±5.85 (29.00-55.00)	32.47±2.17 (30.00-35.00)
อุณหภูมิ (°ซ)	27.67±0.86 (26.10-28.70)	27.40±0.60 (26.80-28.30)	27.83±0.99 (26.10-29.40)	27.76±1.34 (25.40-29.40)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองไนตริฟิเคชันที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันในแต่ละช่วงเวลามาคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนียที่เวลา 48 ชม. ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าที่ระยะเวลาในการบ่มตัวกรอง 1 เดือน ตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 40.75-53.25 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนที่ระยะเวลาในการบ่มตัวกรอง 2 และ 3 เดือน พบว่าตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนียต่างกันจะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่แตกต่างกัน โดยตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 มก.ในโตรเจน/ล. มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 0.5 และ 2 มก.ในโตรเจน/ล.

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่ามีผลร่วมระหว่างเวลาในการบ่มตัวกรองไนตริฟิเคชันและความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ในการบ่มตัวกรองอย่างมีนัยสำคัญ ( $P=0.000$ ) แสดงว่าทั้งระยะเวลาในการบ่มตัวกรองและความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยระยะเวลาในการบ่มตัวกรองเท่ากันแต่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกันทำให้มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่แตกต่างกัน ในขณะที่ตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากันแต่มีระยะเวลาในการบ่มที่แตกต่างกัน พบว่าระยะเวลาที่นานขึ้นจะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้น โดยผลการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 30-120 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดแอมโมเนียจากงานวิจัยอื่นที่ทำการทดลองในช่วงความเค็ม 20-35 พีเอสยู พบว่ามีค่า 60-870 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกันในเวลาต่างๆของการทดลอง รายละเอียดแสดงในภาคผนวกที่ จ-4

ระยะเวลาในการบ่มตัวกรองชีวภาพ	อัตราการบำบัดแอมโมเนีย (มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน)			
	ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 มก. ในโตรเจน/ล.	ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.5 มก. ในโตรเจน/ล.	ความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก. ในโตรเจน/ล.	ความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 มก. ในโตรเจน/ล.
เดือนที่ 1	40.75±3.46	47.97±11.11	53.25±8.66	44.19±14.74
เดือนที่ 2	59.29±9.09	47.04±6.35	52.83±43.37	113.71±7.94
เดือนที่ 3	33.29±6.47	40.84±7.17	34.55±8.04	118.91±6.70
เดือนที่ 4	48.22±10.53	-	49.90±9.58	-
เดือนที่ 5	109.52±10.89	-	110.61±2.28	-
เดือนที่ 6	82.35±26.56	-	114.21±21.01	-

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (Two-way ANOVA)

	Probability
ระยะเวลาการบ่มตัวกรอง (เดือน)	0.000
ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. ในโตรเจน/ล.)	0.000
ผลร่วมระหว่างเดือนและความเข้มข้น (Interaction)	0.000

ค่าเฉลี่ยของปัจจัย (Pooled means) ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

เดือน	กลุ่ม		
	a	b	c
เดือนที่ 1	46.54±4.39		
เดือนที่ 2		68.21±4.39	
เดือนที่ 3	56.89±4.39	56.89±4.39	
เดือนที่ 4	49.05±6.21		
เดือนที่ 5			110.06±6.21
เดือนที่ 6			98.28±6.21
ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. ในโตรเจน/ล.)	a	b	c
ความเข้มข้น 0 มก. ในโตรเจน/ล.		62.23±3.58	
ความเข้มข้น 0.5 มก. ในโตรเจน/ล.	45.28±5.07		
ความเข้มข้น 2 มก. ในโตรเจน/ล.		69.22±3.58	
ความเข้มข้น 10 มก. ในโตรเจน/ล.			92.27±5.07

ตารางที่ 4.8 ทบทวนเอกสารอัตราการบำบัดแอมโมเนียของงานวิจัยอื่นๆ เทียบกับงานวิจัยนี้

ชนิดของ ตัวกรองชีวภาพ	ความเค็ม (พีเอสยู)	อัตราการบำบัด แอมโมเนีย (มก.แอมโมเนีย- ไนโตรเจน/ตร.ม/วัน)	อ้างอิง
Fixed film (KMT media)	5-35	620-770	Lyssenko และ Wheaton (2006)
Fixed film (Bioball)	30	140-870	Silapakul และคณะ (2005)
Fixed film (Geotextile fabric)	น้ำทะเล (เลี้ยงกุ้ง)	70	Erlar และคณะ (2004)
Submerged biofilter	-	10-70	Tseng และ Wu (2004)
Moving bed bioreactor (MBB)	20	590-750	Tal และคณะ (2003)
Fluidized beds filter	-	220-270	Sandu และคณะ (2002)
Fixed film (Porous media)	-	480	Zhu และ Chen (2001)
Fluidised bed biofilter	-	270	Skjolstrup (1998)
Microbead filter	-	130-570	Greiner และ Timmons (1998)
Trickling filter	น้ำทะเล ไม่ระบุความเค็ม	280	Nijhof และ Bovendeur (1990)
Fixed film, submerged (BCN-009)	30	30-120	งานวิจัยนี้

จากการติดตามตรวจสอบการเกิดฟิล์มชีวภาพบนพื้นผิวตัวกรองโดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าตัวกรองที่บ่มที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายหลังจากการบ่มเป็นเวลา 2 เดือนแบคทีเรียที่ยึดเกาะบนผิวพลาสติกคล้ายคลึงกันโดยเป็นกลุ่มแบคทีเรียเส้นใยและรูปแท่ง โดยตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. มีปริมาณแบคทีเรียหนาแน่นกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อระยะเวลาบ่มตัวกรองเพิ่มขึ้นเป็น 4 เดือน พบว่าตัวกรองจากทั้ง 2 ความเข้มข้นกลับมีจำนวนของแบคทีเรียที่มองเห็นรูปร่างเซลล์ชัดเจนน้อยลง โดยตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนียเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. มีแบคทีเรียเส้นใยเป็นกลุ่มเด่น ที่ระยะเวลาการบ่มตัวกรอง 6 เดือน พบว่าตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.แบคทีเรียบนผิวตัวกรองเกาะรวมกันเป็นกลุ่มและมีจำนวนน้อยมาก ในขณะที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ไม่พบว่ามีแบคทีเรียเกาะอยู่บนผิวของตัวกรอง และตัวกรองที่บ่มในแอมโมเนียทั้ง 2 ความเข้มข้นมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มหนาเคลือบอยู่บนผิวของพลาสติก ซึ่งน่าจะเกิดจากการทับถมกันแบคทีเรียที่ตายบนพื้นผิวตัวกรอง



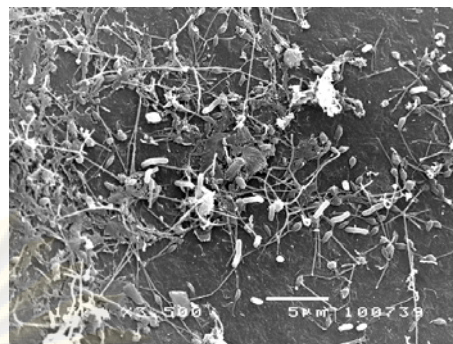
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.

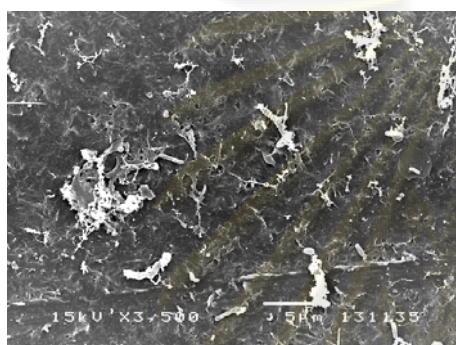


2 เดือน

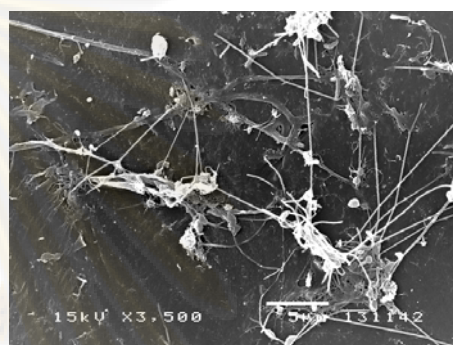
แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



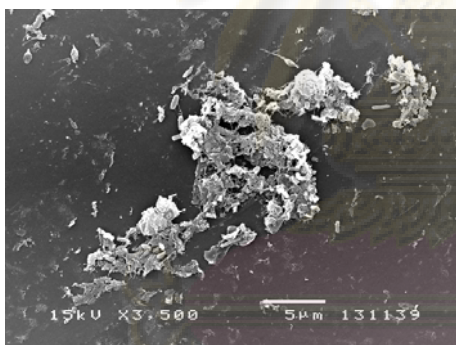
2 เดือน



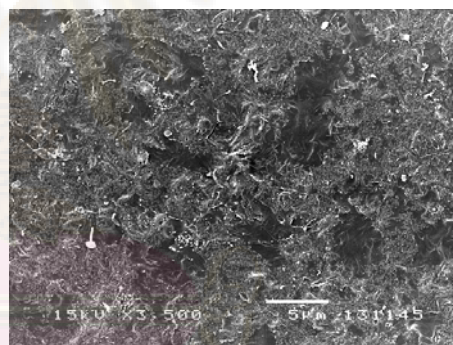
4 เดือน



4 เดือน



6 เดือน

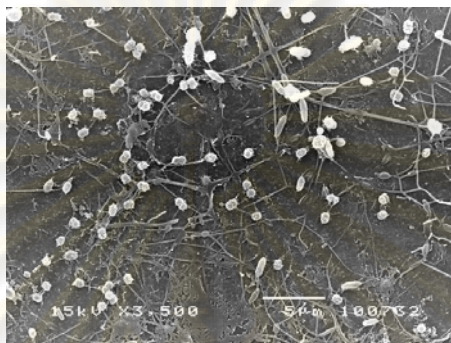


6 เดือน

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันที่บ่มในสถานะความเข้มข้นแอมโมเนีย 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน (กำลังขยาย 3500 เท่า)

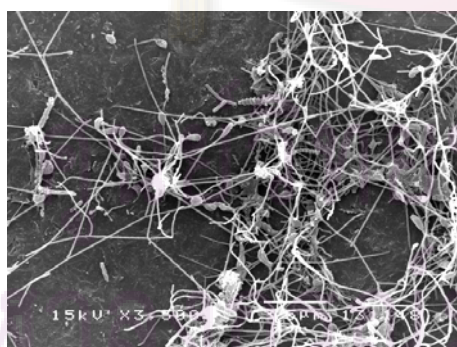
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2 เดือน พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวกรองมีกลุ่มแบคทีเรียเส้นใยและแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ทั่วบนผิวของตัวกรอง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวกรองที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2 เดือน

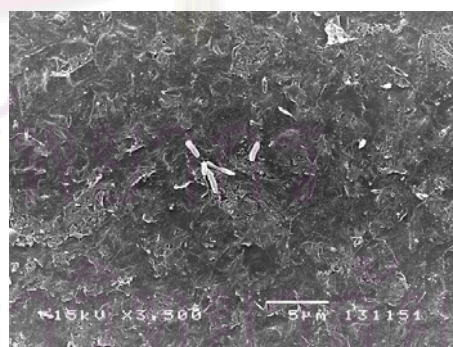


รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2 เดือน (กำลังขยาย 3500 เท่า)

สำหรับการตรวจสอบการเกิดฟิล์มชีวภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 1 เดือน พบว่าที่พื้นผิวของตัวกรองมีกลุ่มแบคทีเรียรูปร่างเป็นเส้นใยยึดเกาะกันเป็นกลุ่มและมีจำนวนมาก แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มตัวกรองเป็น 3 เดือน กลับพบการลดลงของแบคทีเรียกลุ่มเส้นใยอย่างเห็นได้ชัดโดยพบเพียงชั้นฟิล์มหนาเคลือบอยู่และพบแบคทีเรียรูปท่อน กระจายอยู่บนผิวของตัวกรองบ้างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.16



1 เดือน



3 เดือน

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่บ่มในสภาวะความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 1 และ 3 เดือน (กำลังขยาย 3500 เท่า)



#### 4.3 ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพในการบำบัดคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง

การทดลองนี้เป็นการนำตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงห้วเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีห้วเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรีย ประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองที่ผ่านมา สำหรับใช้ควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะคล้ายจริงของระบบบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิดแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ซึ่งบ่อรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ เนื่องจากระบบนิเวศภายในบ่อไม่เอื้ออำนวยให้เกิดกระบวนการไนโตรฟิเคชันที่สมบูรณ์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน(ตัวกลางใหม่) และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงห้วเชื้อไนโตรไฟอิงแบคทีเรียแล้ว ทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก. ในถังพลาสติกบรรจุน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ปริมาตร 450 ลิตร เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง สำหรับการให้อาหารกุ้งใช้อาหารที่มีขายตามท้องตลาด ซึ่งปริมาณที่ให้คำนวณจากร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัว โดยเริ่มต้นการทดลองให้อาหารกุ้งวันละ 10.93 ก. เท่ากันทุกถังแบ่งเป็นวันละ 3 มื้อ ในช่วงวันที่ 31-60 ของการทดลองได้ปรับเปลี่ยนปริมาณอาหารให้เพิ่มขึ้นเป็นวันละ 14.78-16.46 ก. โดยในแต่ละถังจะให้อาหารไม่เท่ากันเนื่องจากกุ้งมีการเติบโตที่ไม่เท่ากัน และในช่วงสุดท้ายของการทดลองวันที่ 61-90 ได้เพิ่มอาหารกุ้งเป็นวันละ 19.72-23.33 ก.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3.1 คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้ง

#### - แอมโมเนีย

ผลการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรตของตัวอย่างน้ำในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าถึง ชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ดีกว่าถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุม โดยในถังที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วมีความเข้มข้นของ แอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 2.10 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีค่าแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $0.25 \pm 0.45$  มก. ไนโตรเจน/ล. โดยมีแอมโมเนียสะสมในน้ำเพียง 6 วันแรกของการทดลอง จากนั้นระบบสามารถ ควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ตลอดการทดลอง ส่วน ถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่พบว่ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $0.35 \pm 0.82$  มก.ไนโตรเจน/ล. มีค่าแอมโมเนียสูงสุด 3.82 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 8 ของการ ทดลอง โดยมีปริมาณแอมโมเนียสะสมมากกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 14 วัน นับจากเริ่ม การทดลอง ขณะที่ถึงชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ พบว่ามีความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ย  $0.58 \pm 1.16$  มก.ไนโตรเจน/ล. โดยในวันที่ 12 มีปริมาณแอมโมเนียสะสมสูงถึง 4.3 มก.ไนโตรเจน/ล. และเกิดการสะสมแอมโมเนียในช่วง 16 วันแรกของการทดลอง ซึ่งนับว่ามีแอมโมเนียสะสมอยู่ใน น้ำนานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถึงชุดทดลองที่ติดตั้ง ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว จากผลการทดลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าถึงชุดทดลองที่ติดตั้งตัว กรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีค่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งซึ่งได้ผล สอดคล้องกับรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) กล่าวว่า กุ้งบางชนิดสามารถทนอยู่ในน้ำที่มี แอมโมเนียความเข้มข้นสูงถึง 4.9 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอายุและชนิดของกุ้ง แต่ระดับ แอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงกุ้งควรมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. และหากมี แอมโมเนียอิสระในน้ำมากกว่า 0.4 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำให้กุ้งเครียดจนอาจจะทำให้กุ้งตายได้ (ชลอ ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชกุล, 2547)

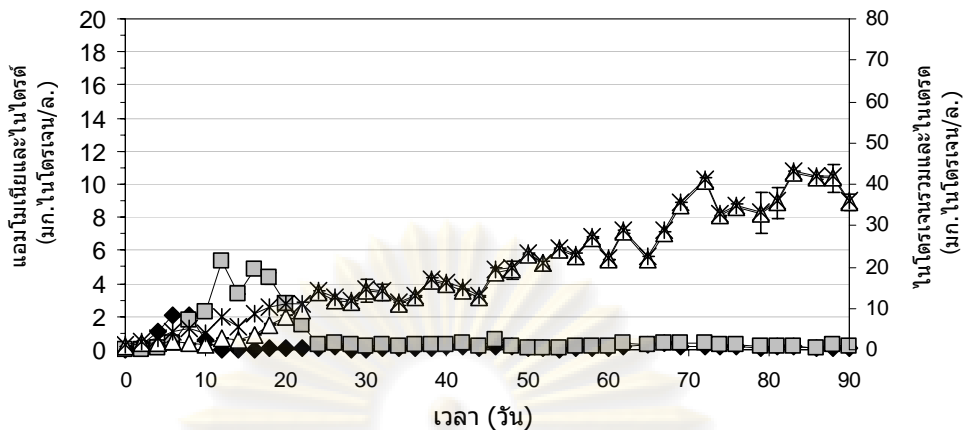
#### - ไนไตรต์

สำหรับความเข้มข้นของไนไตรต์พบว่าถึงชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อ แล้วมีไนไตรต์เฉลี่ย  $0.80 \pm 1.32$  มก./ล. และพบว่ามีไนไตรต์สะสมในช่วงวันที่ 8-22 ของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.40-5.33 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นความเข้มข้นของไนไตรต์ลดลงต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ส่วนถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่เริ่มมี การสะสมของไนไตรต์ในวันที่ 8 ของการทดลอง จากนั้นความเข้มข้นของไนไตรต์ค่อนข้างคงที่อยู่ที่ ในช่วง 8-10 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีไนไตรต์เฉลี่ย  $3.49 \pm 4.00$  มก.ไนโตรเจน/ล. จนกระทั่งวันที่ 52

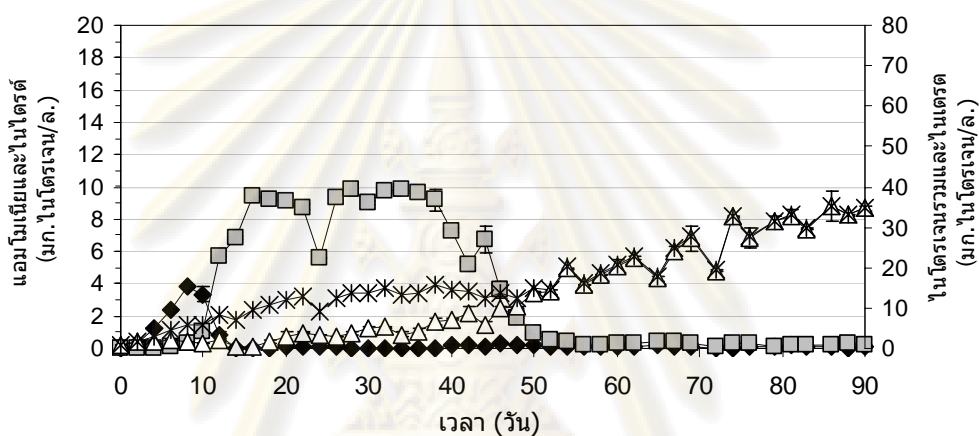
พบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนถึงชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ พบว่าไนไตรต์มีความเข้มข้นสูงกว่า 8.3 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 16 ของการทดลองและมีความเข้มข้นของไนไตรต์สะสมสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับ 16.69 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งอยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (Hargreaves, 1998) โดยมีค่าไนไตรต์เฉลี่ยเท่ากับ  $4.65 \pm 5.76$  มก.ไนโตรเจน/ล. จากผลการทดลองพบว่าถึงเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมทั้งสองถึงมีไนไตรต์เฉลี่ยสูงกว่า 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้ง (ชลอ ลิมสุวรรณ, 2535) ซึ่งโดยทั่วไปความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำเต็มควรมีค่าไม่เกิน 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) แต่จากการทดลองพบว่ากุ้งยังคงมีชีวิตอยู่ได้จากรายงานของ Mishra และคณะ (2008) ที่ได้ทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ที่มีความเข้มข้นของไนไตรต์สูงกว่า 20 มก.ไนโตรเจน/ล. เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ที่สูงระดับนี้ยังไม่ทำให้กุ้งตายในทันที ทั้งนี้ Hart และ O'sullivan (1993) กล่าวว่ากุ้งบางชนิดสามารถทนอยู่ในน้ำที่มีไนไตรต์ความเข้มข้นสูงถึง 60 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้เป็นเวลานานก่อนที่จะค่อยๆตายเนื่องจากพิษของไนไตรต์

#### - ไนเตรต

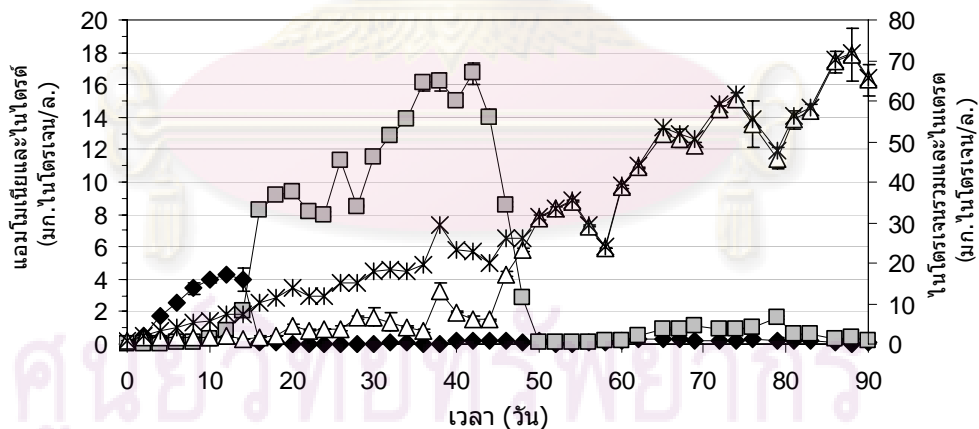
สำหรับความเข้มข้นของไนเตรตในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว พบว่ามีไนเตรตสะสมเพิ่มขึ้นทุกวัน โดยมีไนเตรตเฉลี่ย  $18.60 \pm 12.87$  มก.ไนโตรเจน/ล. จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 35.68 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่พบว่าความเข้มข้นของไนเตรตมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีความเข้มข้นไนเตรตเฉลี่ยเท่ากับ  $12.82 \pm 11.70$  มก.ไนโตรเจน/ล. และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีไนเตรตสะสมในน้ำเท่ากับ 34.70 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถึงชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตไม่แตกต่างกันมากนักและเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีไนเตรตสะสมอยู่ในน้ำปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ในถึงชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $24.00 \pm 23.87$  มก.ไนโตรเจน/ล. และมีไนเตรตสะสมสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีไนเตรตสะสมในน้ำสูงถึง 65.28 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่ง Whiston และคณะ (1994) ได้เสนอไว้ว่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรสูงกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล. ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่อการเลี้ยงกุ้งควรมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากถังเลี้ยงกุ้ง นอกจากนี้จากรายงานของ Muir และคณะ (1991) รายงานว่าที่ระดับความเข้มข้นของไนเตรต 100 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำให้กุ้งตายเช่นเดียวกับ Hart และ O'sullivan (1993) ที่กล่าวว่าในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 100 มก.ไนโตรเจน/ล.



ถึงเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว



ถึงเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่



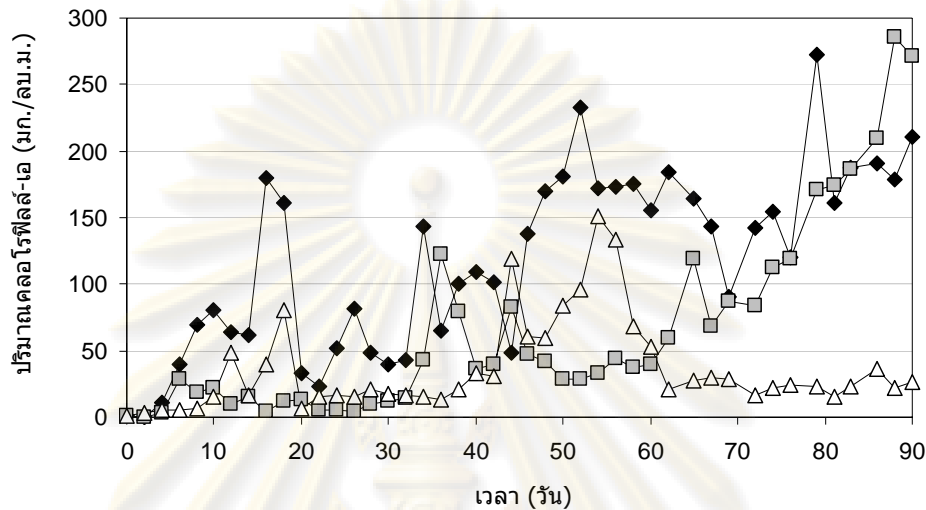
ถึงเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ

รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว (บน) ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (กลาง) และถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ (ล่าง) ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง 90 วัน โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต และ (\*) แสดงความเข้มข้นไนโตรเจนรวม

การสะสมไนเตรดที่พบในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ (รูปที่ 4.17 ล่าง) เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจนรวมแล้วจะเห็นได้ว่าในช่วงท้ายของการทดลอง หลังจากวันที่ 50 เป็นต้นไป จะพบการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ โดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรดโดยไม่พบการสะสมของไนไตรต์ นั่นคือรูปแบบของบ่อเลี้ยงถังชุดควบคุมในช่วงท้ายมีลักษณะเป็นบ่อเลี้ยงถังแบบตะกอนแขวนลอย (Active suspension pond system) หรือแบบตะกอนแขวนลอยที่มีการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic suspended-growth system) ซึ่งตะกอนดังกล่าวมีทั้งที่เป็นเซลล์แพลงก์ตอนและที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Floc) ของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในน้ำที่มาจับตัวอยู่รวมกัน (Hargreaves, 2006; Schryver และคณะ, 2008; Azim และ Little, 2008) รูปแบบของบ่อลักษณะนี้เกิดได้เมื่อมีการให้อากาศอย่างเพียงพอทำให้ในน้ำมีปริมาณออกซิเจนสูงและมีการหมุนเวียนน้ำภายในบ่อดี ทำให้มีการฟุ้งกระจายของตะกอนในมวลน้ำตลอดเวลา อย่างไรก็ตามปัญหาของน้ำที่มีแอมโมเนียและไนไตรต์สูงในช่วง 60 วันแรกของการทดลองในถังชุดควบคุมเป็นสิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยง ซึ่งการจัดให้มีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันภายในถังสามารถลดปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ในถังเลี้ยงกุ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการตรึงหัวเชื้อบนตัวกรองชีวภาพล่วงหน้าก่อนนำมาใช้งาน จะทำให้ระบบบำบัดไนตริฟิเคชันสามารถทำงานได้ตั้งแต่เริ่มต้นการเลี้ยงกุ้ง ส่งผลให้พบแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับถังชุดควบคุม ในขณะที่การใช้ตัวกรองชีวภาพใหม่ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติจะต้องใช้เวลาประมาณ 50 วันกว่าที่ตัวกรองชีวภาพจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่พบการสะสมของไนไตรต์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอในมวลน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดการทดลอง โดยในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองสูงกว่าถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของการทดลองพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์-เอในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีค่าสูงกว่าถังเลี้ยงกุ้งถังอื่น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 188 มก./ล. ในวันที่ 16 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ค่อยๆลดลงในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งเป็นไปได้ว่าการลดลงของแอมโมเนียเกิดจากการที่แพลงก์ตอนพืชนำแอมโมเนียมาใช้ในการเติบโต และในช่วงกลางของการทดลองพบว่าถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอมากขึ้น เนื่องจากได้มีการเพิ่มอาหารกุ้งจากวันละ 10.9 ก. มาเป็นวันละ 14.7-16.4 ก. ซึ่งปริมาณอาหารในแต่ละถังจะไม่เท่ากันเนื่องจากการให้อาหารกุ้งจะคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวกุ้งที่มีอยู่ในถัง โดยปริมาณอาหารที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งมีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงขึ้น ดังนั้นแพลงก์ตอนพืชจึงสามารถนำแอมโมเนียมาใช้ได้ทำให้เติบโตได้ดี โดยในวันที่ 52 ของการทดลองพบว่าน้ำจากถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอสูงถึง 232 มก./ล.

สังเกตได้จากน้ำตัวอย่างเมื่อตั้งทิ้งไว้จะมีสีเขียวของแพลงก์ตอนพืชที่ตกตะกอนอยู่ ส่วนน้ำจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว น้ำมีสีเขียวใสและมีตะกอนของแพลงก์ตอนพืชอยู่น้อย (รูปที่ 4.19)



รูปที่ 4.18 ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอในมวลน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง 90 วัน ในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ (◆) ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (◼) และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว (△)

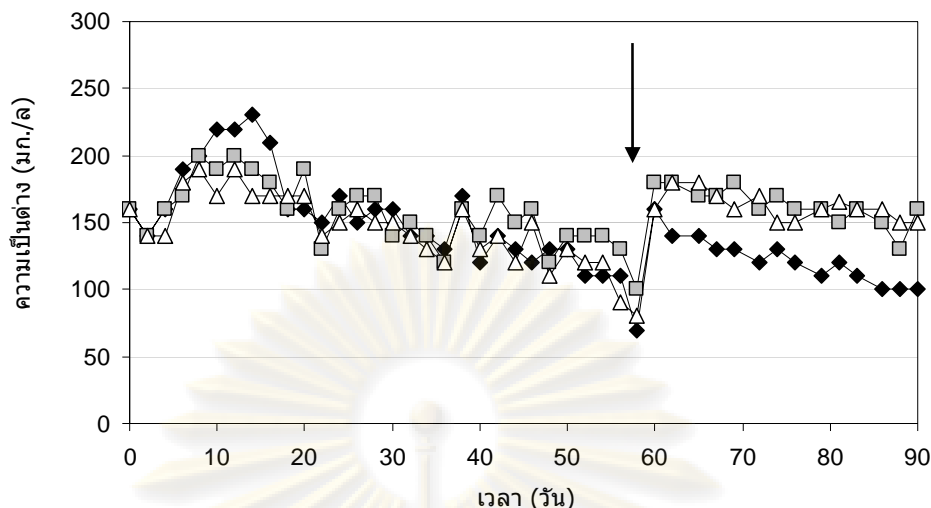
ในช่วงท้ายของการทดลองได้มีการเพิ่มอาหารกุ้งเป็นวันละ 19.7-23.3 ก. พบว่าถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพและติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่มีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าสูงกว่า 200 มก./ล. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงท้ายของการทดลอง โดยในวันที่ 60-90 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $26.26 \pm 9.38$  มก./ล. ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับถังเลี้ยงกุ้งอีกสองถังดังที่กล่าวไปแล้ว เมื่อสังเกตสีของน้ำในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่าน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมทั้งสองถังมีสีเขียวเข้มและมีตะกอนแขวนลอยมาก ซึ่งแตกต่างจากน้ำในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วที่มีสีเขียวใสกว่า ดังรูปที่ 4.19 และผลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนพบว่า ไม่มีการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำแต่ปริมาณไนเตรตมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นน่าจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ขึ้นภายในถังเลี้ยงกุ้ง โดยไนตริไฟอิงแบคทีเรียทั้งกลุ่ม AOB และ NOB สามารถเติบโตและเพิ่มจำนวนขึ้นมากจนสามารถที่จะทำงานได้ดีและควบคุมคุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งได้



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างน้ำจากถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว ในวันที่ 52 และ 90 ของการทดลองเลี้ยงกุ้ง

- สภาพความเป็นด่าง

ก่อนเริ่มทำการทดลองได้มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในถังเลี้ยงกุ้งเพื่อปรับความเป็นด่างของน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 150 มก./ล. จากการทดลองพบว่าน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกถังมีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นใน 14 วันแรกของการทดลอง และจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งในวันที่ 60 ของการทดลองพบว่าความเป็นด่างลดลงต่ำกว่า 100 มก./ล. (รูปที่ 4.20) ซึ่งค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำและการทำงานของตัวกรองไนตริฟิเคชันต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O'sullivan, 1993) จึงได้เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปจนถึงถังเลี้ยงกุ้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้นในน้ำให้มีความเข้มข้นอยู่ประมาณ 180 มก./ล. จากนั้นพบว่าความเป็นด่างในน้ำค่อยๆมีความเข้มข้นลดลงเรื่อยๆจนสิ้นสุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 100-150 มก./ล. แสดงว่ามีกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นภายในถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลอง เนื่องจากความเป็นด่างที่ลดลงส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ไนตริไฟอิงแบคทีเรียนำคาร์บอนจากโซเดียมไบคาร์บอเนตมาใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนสำหรับการเจริญเติบโต ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการความเป็นด่างในรูป  $\text{CaCO}_3$  ปริมาณ 7.14 ก. ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรต (Tchobanoglous และคณะ, 2004) และกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้นยังเป็นกระบวนการที่ผลิตกรดทำให้ในน้ำมีไฮโดรเจนไอออนอิสระ ซึ่งส่งผลให้ความเป็นกรด-ด่างของน้ำลดลง (Wheaton, 1977) ดังนั้นการเติมไบคาร์บอเนตจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน เพื่อคงการเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรียและควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำ



รูปที่ 4.20 สภาพความเป็นต่างในมวลน้ำของถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง กุ้ง 90 วัน ในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ (◆) ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ใหม่ (□) และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว (△)  
หมายเหตุ : ลูกศรแสดงวันที่ทำการเติม โซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปในถังเลี้ยงกุ้ง

#### - คุณภาพน้ำอื่นๆ

คุณภาพน้ำด้านกายภาพอื่นๆ ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม่เป็นเวลา 90 วัน แสดงในตารางที่ 4.9 ผลการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.75-6.82 มก./ล. เป็นระดับปกติที่พบในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป ซึ่ง Tookwinas (2000) เสนอว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งควรมีค่ามากกว่า 3.5 มก./ล. และ Lawson (1995) เสนอว่าในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5-6 มก./ล. ดังนั้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเลี้ยงกุ้งน่าจะเพียงพอต่อความต้องการออกซิเจนของกุ้งและ ไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ส่วนความเป็นกรด-ด่างในถังเลี้ยงกุ้งทุกถังมีค่าประมาณ 8 ซึ่งจัดว่าเป็นระดับ ความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 7-8.5 เหมาะสมต่อการอยู่อาศัยของกุ้ง (Hart และ O'sullivan, 1993) ความเค็มของน้ำในถังเลี้ยงกุ้งพบว่ามีค่าประมาณ 31-32 พีเอสยู ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อ การเลี้ยงกุ้งขาว (ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์ชกุล, 2547) และผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ของน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองมีค่าประมาณ 28°C ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่มีความ เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งขาวเช่นกัน (ชโล ลิมสุวรรณ และ พรเลิศ จันทรรักษ์ชกุล, 2547)



ตารางที่ 4.9 คุณภาพน้ำในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว เมื่อเลี้ยงกึ่งขบวนการเป็นเวลา 90 วัน

คุณภาพน้ำ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)		
	ถังชุดควบคุม	ถังชุดที่ใส่ตัวกรองใหม่	ถังชุดที่ใส่ตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.58 $\pm$ 1.16 (0.00-4.32)	0.35 $\pm$ 0.82 (0.00-3.82)	0.25 $\pm$ 0.45 (0.00-2.11)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	4.65 $\pm$ 5.76 (0.00-16.69)	3.49 $\pm$ 4.00 (0.00-9.87)	0.80 $\pm$ 1.32 (0.01-5.34)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	24.00 $\pm$ 23.87 (0.96-71.53)	12.82 $\pm$ 11.70 (0.04-35.14)	18.60 $\pm$ 12.87 (0.97-42.59)
ไนโตรเจนรวม (มก.ไนโตรเจน/ล.)	42.05	24.59	35.18
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	6.75 $\pm$ 0.70 (5.00-8.82)	6.79 $\pm$ 0.73 (4.88-8.76)	6.82 $\pm$ 0.71 (4.86-8.76)
ความเป็นกรด-ด่าง	7.96 $\pm$ 0.22 (7.50-8.44)	8.02 $\pm$ 0.20 (7.57-8.50)	8.01 $\pm$ 0.18 (7.49-8.44)
ความเค็ม (พีเอสยู)	31.64 $\pm$ 2.10 (28.00-36.00)	31.02 $\pm$ 1.81 (25.00-35.00)	31.78 $\pm$ 1.79 (29.00-35.00)
สภาพความเป็นด่าง (มก./ล.)	143.18 $\pm$ 35.16 (70-230)	157.95 $\pm$ 21.95 (100-200)	150.11 $\pm$ 24.17 (80-190)
อุณหภูมิ (°C)	28.06 $\pm$ 1.81 (23.70-31.80)	28.19 $\pm$ 1.83 (24.10-31.80)	28.13 $\pm$ 1.75 (24.20-31.70)
คลอโรฟิลล์-เอ (มก./ล.)	117.35 $\pm$ 67.83 (0-271.98)	64.31 $\pm$ 71.86 (0-285.17)	36.02 $\pm$ 34.95 (1-150.94)
ตะกอนแขวนลอยใน วันสุดท้าย (มก./ล.)	647.27	200.86	88.12

รูปที่ 4.21 เป็นภาพถ่ายที่แสดงสภาพของถังเลี้ยงกึ่งขบวนการในวันเริ่มต้นและวันสิ้นสุดการทดลอง โดยในช่วงเริ่มต้นการทดลองพบว่าลักษณะของน้ำภายในถังเลี้ยงกึ่งขบวนการทดลองมีความใสจนสามารถมองเห็นผนังและพื้นถังพลาสติกได้ และตัวกรองชีวภาพ R-190 ที่อยู่ในถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วจะเห็นสีของพลาสติกเป็นสีด่างอย่างชัดเจน แต่หลังจากการเลี้ยงกึ่งขบวนการเป็นเวลา 90 วัน พบว่าน้ำในถังเลี้ยงกึ่งขบวนการทดลองมีสีเขียวเข้มจนไม่สามารถมองเห็นพื้นของถังพลาสติกได้และผนังด้านข้างของถังจะมีตะกอนสีเขียวเข้มจนถึงดำมาเกาะโดยรอบ ส่วนลักษณะของตัวกรองชีวภาพจากถังชุดทดลองที่

ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วมีสีเขียวเข้มและสังเกตได้ว่ามีตะกอนมาเกาะติดอยู่โดยรอบ  
ชั้นตัวกรองชีวภาพ



ถังชุดที่ไม่มีตัวกรอง  
(วันเริ่มต้น)



ถังชุดตัวกรองใหม่  
(วันเริ่มต้น)



ถังชุดตัวกรองที่ตรงหัวเชื้อแล้ว  
(วันเริ่มต้น)



ถังชุดที่ไม่มีตัวกรอง  
(วันที่ 90)



ถังชุดตัวกรองใหม่  
(วันที่ 90)



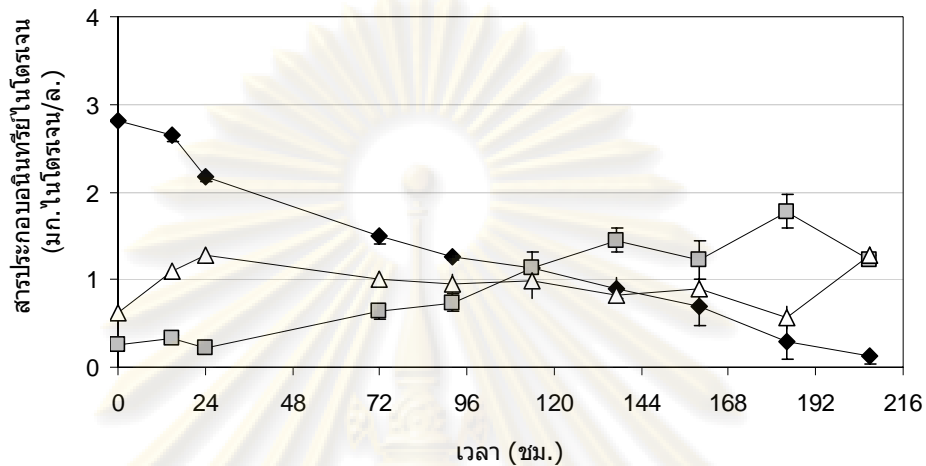
ถังชุดตัวกรองที่ตรงหัวเชื้อแล้ว  
(วันที่ 90)

รูปที่ 4.21 สภาพของถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ  
ใหม่ และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว ในวันที่เริ่มทำการทดลอง (บน)  
และเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน (ล่าง)

#### 4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองไนตริฟิเคชัน

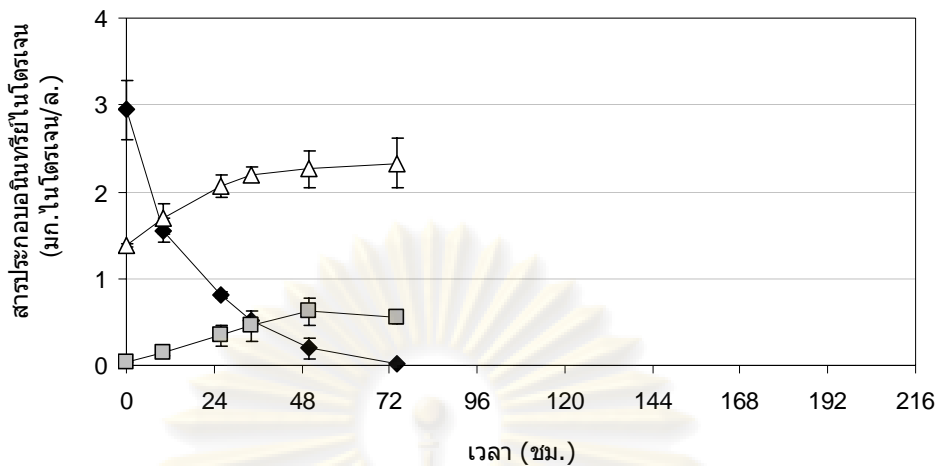
ในการทดลองนี้มีถังเลี้ยงกุ้งจำนวน 2 ถัง ที่ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพคือถังชุดควบคุมที่  
ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว โดยใน  
ระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน ได้สุ่มตัวกรองชีวภาพจากทั้ง 2 ถัง มาตรวจวัดอัตราการ  
บำบัดแอมโมเนียในวันเริ่มต้น วันที่ 60 และ วันที่ 90 ของการทดลอง ผลการทดลองในรูปที่ 4.22  
พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยในวันเริ่มต้น  
เท่ากับ  $30.0 \pm 1.53$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และใช้เวลา 7 วัน ในการลดความเข้มข้น  
ของแอมโมเนียให้ต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และยังพบการสะสมของไนไตรต์โดยมีค่าความ

เข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 1.78 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ความเข้มข้นของไนเตรตค่อนข้างคงที่ตลอดการตรวจวัด แสดงว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อในช่วงก่อนเริ่มทดลองเลี้ยงกุ้งยังเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์

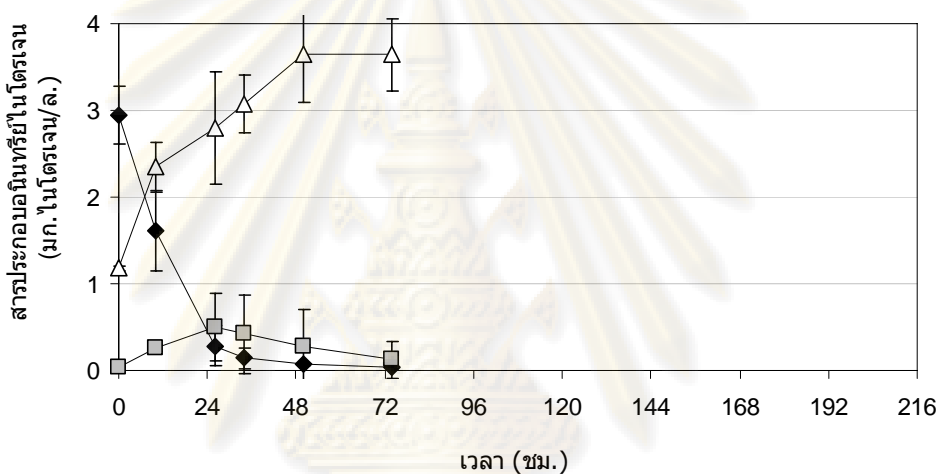


รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ตรึงเชื้อมาจากบ่อเลี้ยงกุ้งของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก่อนเริ่มทดลองเลี้ยงกุ้ง โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้นแอมโมเนีย (□) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

ผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวอย่างตัวกรองชีวภาพที่ทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 60 วัน แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าตัวกรองที่นำมาจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $120.96 \pm 12.62$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และใช้เวลาเพียง 24 ชม. ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และไม่มีไนไตรต์สะสมในถังทดสอบ ส่วนไนเตรตมีความเข้มข้นสูงขึ้นถึง 3.64 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าตัวกรองจากถังเลี้ยงกุ้งนี้สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ ในขณะที่ตัวกรองจากถังควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ซึ่งมีค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $94.40 \pm 12.50$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และต้องใช้เวลาถึง 48 ชม. เพื่อให้แอมโมเนียมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารสะสมของไนไตรต์โดยมีความเข้มข้นสูงสุด 0.62 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งไนไตรต์ไม่ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรต จึงเป็นกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ และพบว่ามีไนเตรตเพียง 2.32 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดการตรวจวัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อก่อนนำมาใช้งาน มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกรองชีวภาพใหม่ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้ง



ถึงเลี้ยงกึ่งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่



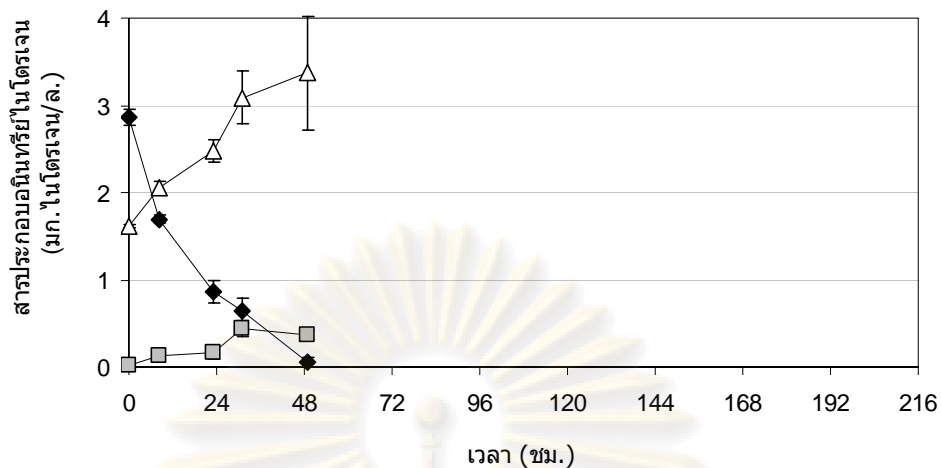
ถึงเลี้ยงกึ่งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว

รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพ จากถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (บน) และจากถึงชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ ตรึงหัวเชื้อแล้ว (ล่าง) เมื่อทำการเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 60 วัน โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้น แอมโมเนีย (■) แสดงความเข้มข้นไนโตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

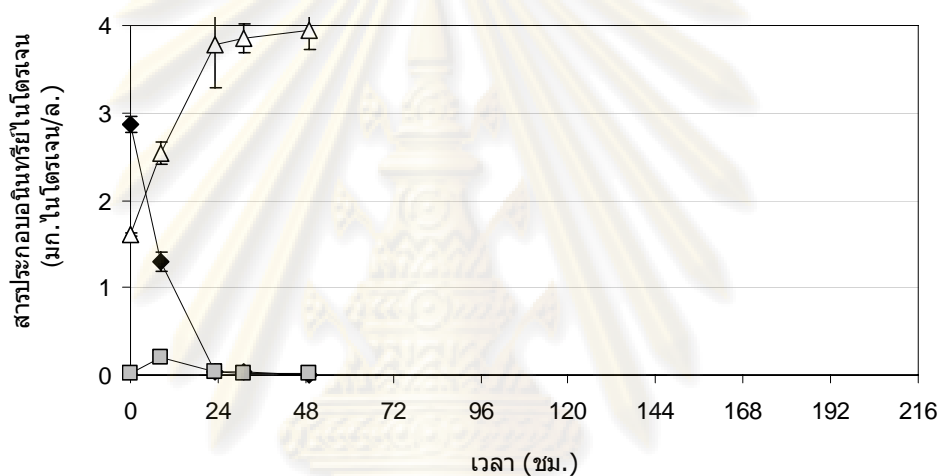
รูปที่ 4.24 เป็นผลการวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งในวันที่ 90 วัน พบว่าตัวกรองที่นำมาจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $142.40 \pm 3.28$  มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวกรองจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $100.32 \pm 11.05$  มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนความเข้มข้นของไนโตรดพบว่าตัวกรองจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วไม่พบการสะสมของไนโตรดและมีความเข้มข้นของไนเตรตสูงขึ้น แสดงว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ในขณะที่ตัวกรองจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่พบว่าในไนโตรดสะสมปริมาณเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดการตรวจวัดโดยมีค่าเท่ากับ 0.36 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนความเข้มข้นของไนเตรตเมื่อสิ้นสุดการตรวจวัดมีค่า 3.36 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ แต่น่าจะมีปริมาณแบคทีเรียกลุ่ม AOB ที่เกาะติดบนผิวตัวกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในวันที่ 60 และแบคทีเรียกลุ่ม NOB น่าจะมีการเติบโตที่ดีขึ้นเช่นกัน สังเกตได้จากปริมาณไนโตรดสะสมที่น้อยกว่า

Lawson (1995) กล่าวว่าตัวกรองไนตริฟิเคชันต้องมีอายุ 30-100 วัน จึงจะสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรดได้อย่างสมบูรณ์ และจากงานวิจัยของ Nijhof และ Bovendeur (1990) พบว่าตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรองสำหรับใช้ในระบบน้ำทะเลต้องใช้เวลาประมาณ 170 วัน ในการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Full-grow stage) ให้สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ ซึ่งตัวกรองชีวภาพในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว ก่อนเริ่มทดลองเลี้ยงกุ้งตัวกรองชีวภาพซึ่งมีอายุ 45 วัน พบว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ แต่ภายหลังเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 60 และ 90 วัน เมื่อนำตัวกรองมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียพบว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์และมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้น นั่นคือการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพ

ในส่วนของตัวกรองไนตริฟิเคชันจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ แม้จะทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 60 วัน และเกิดการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติที่ผิวของตัวกรอง พบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้นแต่ก็ยังเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ แสดงว่าอายุการเตรียมสภาพของตัวกรองไนตริฟิเคชันเป็นเวลา 60 วัน ยังไม่สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้สอดคล้องกับรายงานของ Lawson (1995) และ Nijhof และ Bovendeur (1990)



#### ถังเลี้ยงกึ่งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่

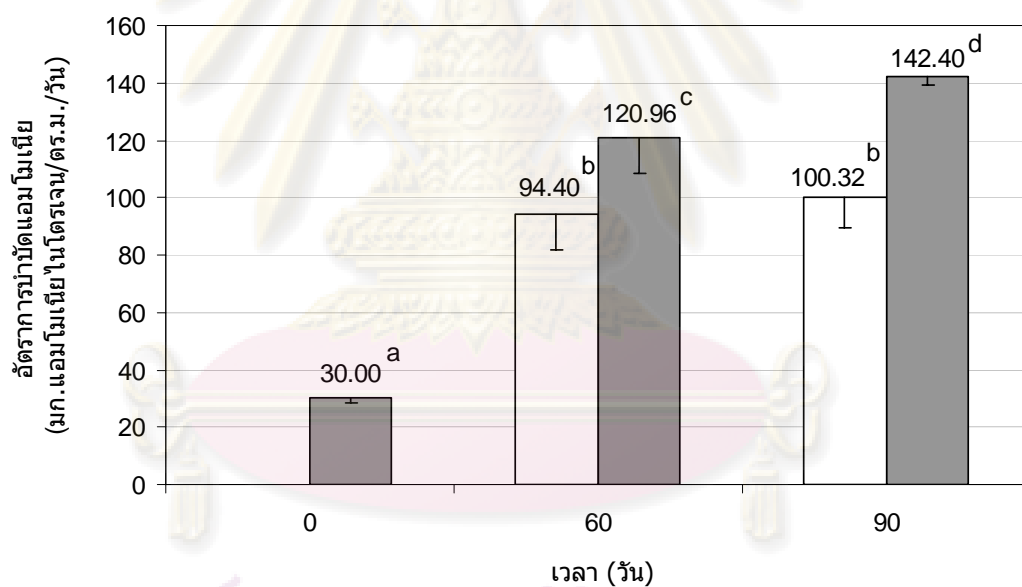


#### ถังเลี้ยงกึ่งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว

รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพ จากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (บน) และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ ตรึงหัวเชื้อแล้ว (ล่าง) เมื่อทำการเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 90 วัน โดยสัญลักษณ์ (◆) แสดงความเข้มข้น แอมโมเนีย (■) แสดงความเข้มข้นไนไตรต์ และ (△) แสดงความเข้มข้นไนเตรต

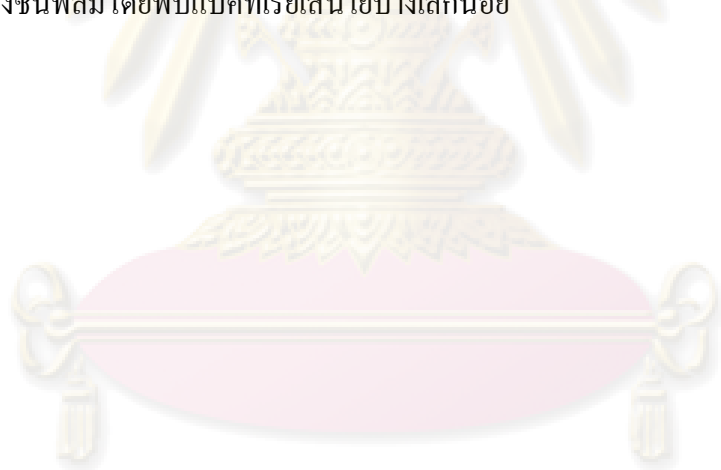
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งที่นานขึ้นมีผลทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าสูงขึ้น น่าจะเป็นผลมาจากแบคทีเรียกลุ่ม AOB มีการเติบโตที่ดีและเพิ่มจำนวนมากขึ้น และภายในถังเลี้ยงกุ้งทั้งสองนั้นมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณแอมโมเนียในน้ำที่มาจาก การขับถ่ายของกุ้งและบางส่วนมาจากการย่อยสลายอาหารกุ้ง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง สภาพความเป็นต่าง ความเค็ม และอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าตัวกรองจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ น่าจะเป็นเพราะตัวกรองที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อในไนโตรไฟอิงแบคทีเรียแล้วจะมี AOB จำนวนหนึ่งอยู่บนผิวของตัวกรอง ดังนั้นเมื่อนำตัวกรองไนโตรไฟเคชันมาใส่ในถังเลี้ยงกุ้งที่มีสภาวะที่เหมาะสมทำให้แบคทีเรียกลุ่ม AOB เพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากตัวกรองใหม่ซึ่งจะต้องใช้เวลาที่นานกว่าในการตรึงหัวเชื้อแบคทีเรียกลุ่ม AOB ให้มายึดเกาะอยู่บนผิวของตัวกรองชีวภาพ



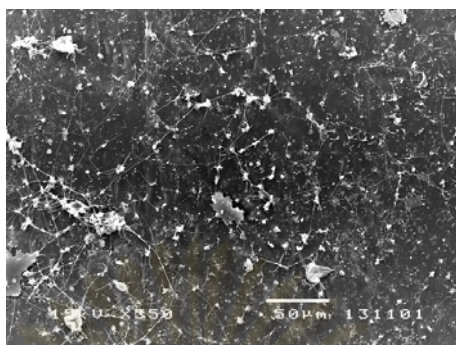
รูปที่ 4.25 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่สุ่มตัวอย่างมาจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (□) และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว (■) ก่อนเริ่มต้นการทดลองและในวันที่ 60 และ 90 ของการทดลอง โดยตัวอักษร a, b, c, และ d แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

จากการตรวจสอบการเกิดฟิล์มชีวภาพบริเวณพื้นผิวตัวกรองโดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งตัวกรองไนตริไฟเคชันที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วเป็นเวลา 45 วัน ก่อนจะนำมาใช้ในถังเลี้ยงกุ้งพบว่ามียูแบคทีเรียทั้งรูปท่อนและเส้นใยกระจายอยู่ทั่วบนผิวของตัวกรอง เมื่อนำตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมาติดตั้งในถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองและทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 30 วัน พบว่าเกิดขึ้นฟิล์มหนาเคลือบอยู่บนผิวของตัวกรองและบนชั้นฟิล์มนั้นมีแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ทั่ว ส่วนตัวกรองจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่พบว่ามียูแบคทีเรียเส้นใยเกาะกันเป็นกลุ่มและมีแบคทีเรียรูปแท่งกระจายอยู่บนผิวของตัวกรอง และเมื่อเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 60 วัน พบว่าผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน โดยพบชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวของตัวกรองหนามาก แต่เมื่อสังเกตตัวกรองที่นำมาจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว พบว่ามีแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ในลักษณะที่ยึดเกาะกับผิวของฟิล์มชีวภาพ และเมื่อทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน พบว่าตัวกรองจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยตัวกรองจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่มีลักษณะเป็นฟิล์มหนาที่ปกคลุมผิวของตัวกรองอย่างสม่ำเสมอ ส่วนตัวกรองจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว พบว่ามีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำและมีแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ตามรูพรุนของชั้นฟิล์ม โดยพบแบคทีเรียเส้นใยบ้างเล็กน้อย

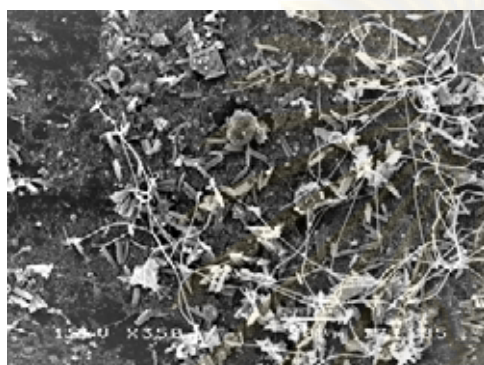


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

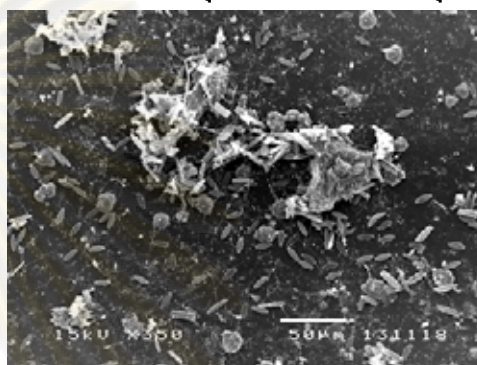




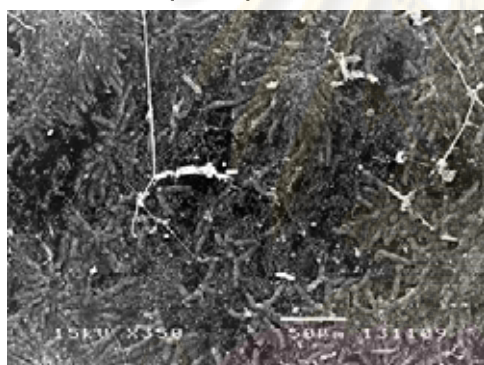
ชุดทดลองก่อนเริ่มเลี้ยงกุ้ง



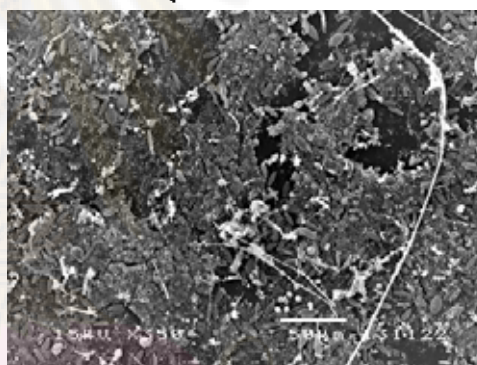
ชุดควบคุม 30 วัน



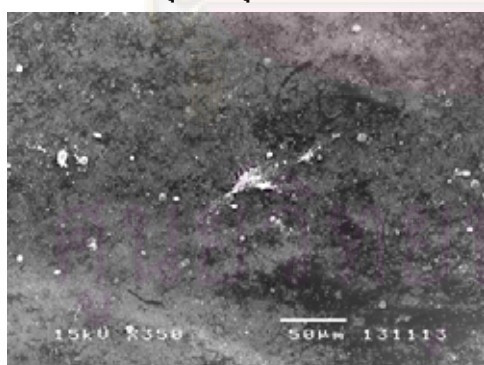
ชุดทดลอง 30 วัน



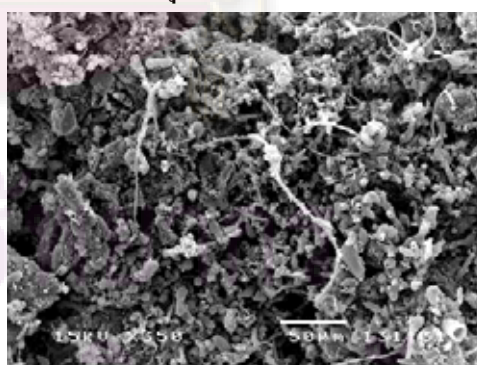
ชุดควบคุม 60 วัน



ชุดทดลอง 60 วัน



ชุดควบคุม 90 วัน

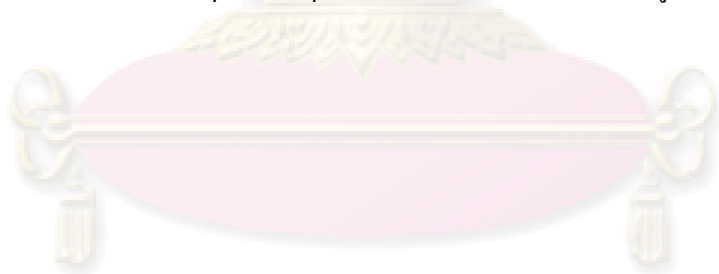


ชุดทดลอง 90 วัน

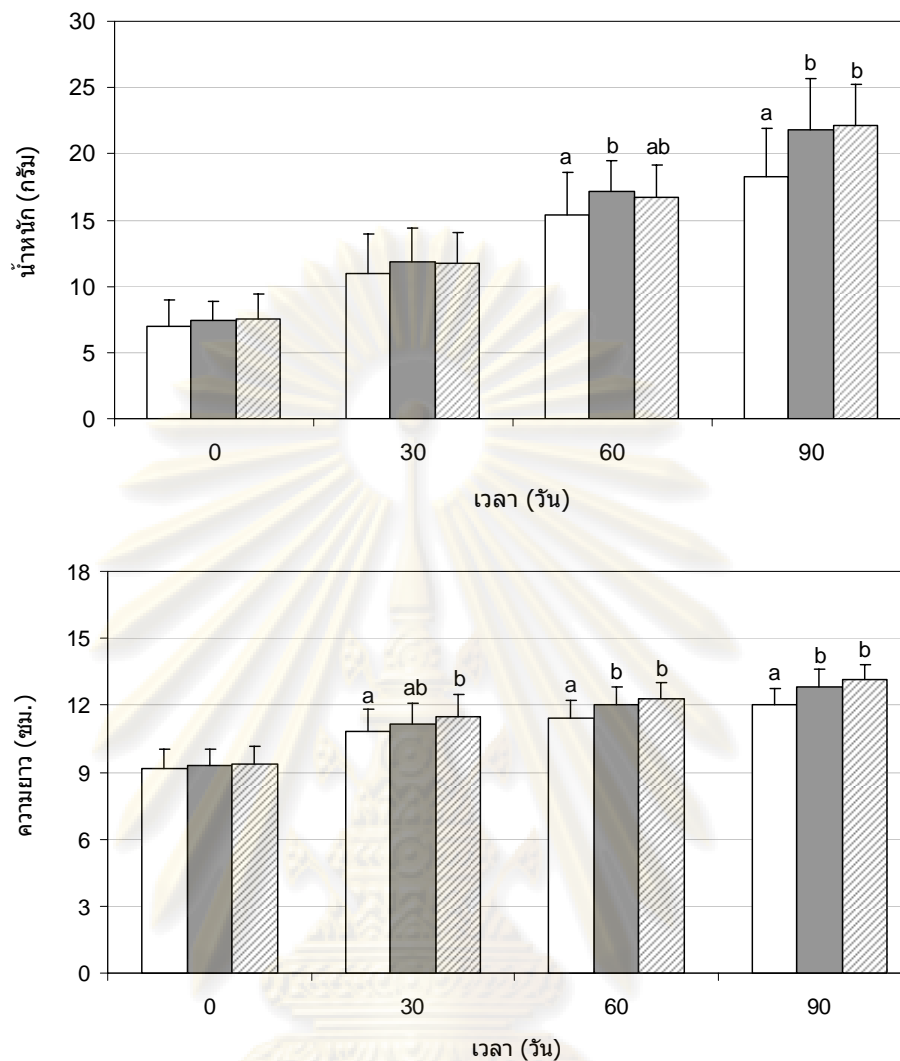
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้ง ชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (ซ้าย) และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว (ขวา) ก่อนการทดลองและวันที่ 30, 60 และ 90 ของการทดลอง (กำลังขยาย 350 เท่า)

### 4.3.3 การเลี้ยงกุ้งและอัตราการเจริญเติบโตของกุ้ง

จากการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม่เป็นเวลา 90 วัน โดยปล่อยกุ้งถึงละ 30 ตัว คิดเป็นความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม. โดยกุ้งมีน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก. และความยาวเฉลี่ย  $9.29 \pm 0.77$  ซม. ในระหว่างการทดลองทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของกุ้งทุกๆ 30 วัน ผลการทดลองในรูปแบบที่ 4.27 พบว่ากุ้งจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองมีการเจริญเติบโตขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองกุ้งที่เลี้ยงจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วมีน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ  $22.18 \pm 3.02$  ก. ส่วนกุ้งจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่มีค่าเท่ากับ  $21.78 \pm 3.88$  ก. และกุ้งจากถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีน้ำหนักเฉลี่ยน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $18.24 \pm 3.67$  ก. เมื่อวัดความยาวพบว่ากุ้งจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองมีความยาวเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยผลจากการวัดความยาวกุ้งในวันสุดท้ายของการทดลอง พบว่ากุ้งจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วมีความยาวเฉลี่ย  $13.17 \pm 0.63$  ซม. ซึ่งมีความยาวเฉลี่ยมากที่สุด ส่วนกุ้งจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ  $12.8 \pm 0.80$  และ  $11.99 \pm 0.77$  ซม. ตามลำดับ จากการทดสอบทางสถิติพบว่า ในวันสิ้นสุดการทดลองกุ้งที่เลี้ยงในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว มีน้ำหนักและความยาวไม่แตกต่างจากกุ้งที่เลี้ยงจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองใหม่ ในขณะที่กุ้งจากถังชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพมีน้ำหนักและความยาวน้อยกว่ากุ้งในถังชุดทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ภาพถ่ายของกุ้งในวันสุดท้ายของการทดลองแสดงในรูปแบบที่ 4.28



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 น้ำหนักเฉลี่ยของกึ่งข้าวแวนนาไม (บน) และความยาวเฉลี่ยของกึ่งข้าวแวนนาไม (ล่าง) ในถึงชุดควบคุมที่ไม่ตัดตั้งตัวกรองชีวภาพ (□) ถึงชุดควบคุมที่ตัดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ (■) และถึงชุดทดลองที่ตัดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว (▨) ในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการทดลอง โดยตัวอักษร a และ b แสดงถึงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ของข้อมูลในแต่ละเดือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายกุ้งในระบบทดลองเมื่อทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 90 วัน

โดยทั่วไปแล้วการเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆในการเพาะเลี้ยง เช่น คุณภาพน้ำ คุณภาพกุ้ง อายุและขนาดกุ้ง ความหนาแน่น ปริมาณและคุณภาพอาหารที่ให้ตลอดการเลี้ยง (Tseng และคณะ, 1998) โดยงานวิจัยนี้ทำการเลี้ยงกุ้งที่ระดับความหนาแน่นปกติ 47 ตัว/ตร.ม. จากผลการทดลองพบว่ากุ้งที่เลี้ยงในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการเจริญเติบโต 0.163 ก./วัน ส่วนกุ้งที่เลี้ยงในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพและถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่มีอัตราการเจริญเติบโต 0.126 และ 0.160 ก./วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับผลการศึกษาของสรเสรีฐ ช่อเจียง และคณะ (2551) ที่รายงานไว้ว่ากุ้งขาวแวนนาไมที่ทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่น 62.5 ตัว/ตร.ม. มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย  $0.15 \pm 0.03$  ก./วัน

จากผลการศึกษาของ Balcazar และคณะ (2007) ที่ทำการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น  $2.2 \pm 0.1$  ก. พบว่ากุ้งมีอัตราการรอดร้อยละ 88.25 และอัตราการแลกเนื้อ 0.75 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ามีค่าอัตราการรอดใกล้เคียงกัน ในขณะที่อัตราการแลกเนื้อจากการศึกษานี้พบว่ามีค่าอัตราการแลกเนื้อที่สูงมาก (ตารางที่ 4.10) เนื่องจากขนาดของกุ้งที่นำมาเริ่มทำการทดลองมีขนาดใหญ่จึงต้องให้อาหารในปริมาณมาก และในระหว่างการเลี้ยงไม่ได้มีการตรวจวัดและปรับปริมาณอาหารตามที่กุ้งกินทุกวัน แต่จะให้อาหารในปริมาณเท่ากันทุกวันจนกว่าจะชั่งน้ำหนักกุ้งในแต่ละเดือนจึงจะทำการปรับปริมาณอาหาร ทำให้อาจมีอาหารที่เหลือค้างในถังเลี้ยงกุ้งในกรณีที่กุ้งกินไม่หมด ซึ่งอาหารที่เหลือนี้จะส่งผลให้อัตราแลกเนื้อมีค่าสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ผลการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมอายุ 90 วัน จากถึงชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถึงชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถึงชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว

ผลการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม	ถึงชุดควบคุม (ไม่มีตัวกรอง)	ถึงชุดควบคุม (มีตัวกรองใหม่)	ถึงชุดทดลอง (มีตัวกรองที่ตรึง แล้ว)
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	90	90	90
จำนวนกุ้งเริ่มต้น (ตัว)	30	30	30
จำนวนกุ้งในวันสุดท้าย (ตัว)	24	25	28
ขนาดน้ำหนักเริ่มต้น (ก.)	6.94±1.99	7.41±1.48	7.54±1.88
ขนาดความยาวเริ่มต้น (ซม.)	9.16±0.85	9.32±0.68	9.38±0.78
ขนาดน้ำหนักสุดท้าย (ก.)	18.24±3.67	21.78±3.88	22.18±3.02
ขนาดความยาวสุดท้าย (ซม.)	11.99±0.77	12.80±0.80	13.17±0.63
น้ำหนักอาหารทั้งหมด (ก.)	1,244.22	1,240.80	1,325.00
น้ำหนักกุ้งที่ปล่อย (กก./ตร.ม., กก./ลบ.ม.)	0.33, 0.46	0.35, 0.49	0.35, 0.50
น้ำหนักกุ้งวันสุดท้าย (กก./ตร.ม., กก./ลบ.ม.)	0.68, 0.97	0.86, 1.21	0.98, 1.38
อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)	0.126	0.160	0.163
ผลผลิต (กก./ไร่)	1,100.96	1,369.50	1,562.22
อัตราการแลกเนื้อ	5.42	3.85	3.35
อัตราการรอดตายวันที่ 30 (ร้อยละ)	93.33	83.33	93.33
อัตราการรอดตายวันที่ 60 (ร้อยละ)	86.66	83.33	93.33
อัตราการรอดตายวันที่ 90 (ร้อยละ)	80.00	83.33	93.33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.4 การประเมินสมดุลของไนโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้ง

ภายหลังกการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 90 วัน ได้ทำการประเมินสมดุลของไนโตรเจนโดยการเปรียบเทียบแหล่งที่มาและปริมาณของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบถังเลี้ยงกุ้งตลอดการทดลองและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลองมาจากอาหารกุ้งเป็นส่วนมากซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 90.83-91.28 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สามารถคำนวณได้มาจากไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดรวมกับไนโตรเจนในตัวกุ้ง ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอย และไนโตรเจนที่หายไปจากระบบจะถูกรวมอยู่ในส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ (Unaccounted Nitrogen) โดยในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีค่าไนโตรเจนในส่วนที่ไม่สามารถระบุได้มากที่สุดถึงร้อยละ 47.44 ซึ่งไนโตรเจนในส่วนอื่นๆนี้อาจจะอยู่ในรูปของตะกอนหรือสูญเสียไปเป็นก๊าซไนโตรเจนจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

สำหรับปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดในถังชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีค่า 29.33 ก. ซึ่งมีค่าสูงกว่าในถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่และถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ครึ่งหัวเชื้อแล้วโดยมีค่า 17.16 และ 24.54 ก. ตามลำดับ ส่วนไนโตรเจนที่เปลี่ยนเป็นเนื้อกุ้งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 17.17-22.85 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ Avnimelech และ Ritvo (2003) ที่กล่าวว่าร้อยละ 25 ของอาหารที่เข้ามาในระบบจะถูกเปลี่ยนเป็นผลผลิตของสัตว์น้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบถึงเลี้ยงกุ้งตลอดการทดลอง  
เปรียบเทียบกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

องค์ประกอบไนโตรเจน	ถึงเลี้ยงกุ้งควบคุม (ไม่ติดตั้งตัวกรอง)		ถึงเลี้ยงกุ้งควบคุม (ตัวกรองใหม่)		ถึงเลี้ยงกุ้งชุดทดลอง (ตัวกรองจริงเชื้อแล้ว)	
	น้ำหนัก (ก.)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	น้ำหนัก (ก.)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	น้ำหนัก (ก.)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)
<u>ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ</u>						
อาหารกุ้ง	75.65	91.28	75.44	90.83	80.56	91.17
กุ้ง	6.77	8.17	7.23	8.70	7.35	8.32
อนินทรีย์ไนโตรเจนละลาย น้ำ (TDIN)	0.45	0.55	0.39	0.47	0.45	0.50
ไนโตรเจนที่เข้าทั้งหมด	82.87	100.00	83.06	100.00	88.36	100.00
<u>ไนโตรเจนในวันสุดท้าย</u>						
ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	29.33	35.39	17.16	20.65	24.54	27.78
อนินทรีย์ไนโตรเจนละลาย น้ำ (TDIN)	29.50	35.60	15.76	18.97	16.21	18.35
กุ้ง	14.23	17.17	17.70	21.31	20.19	22.85
ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้	39.31	47.44	32.45	39.06	27.42	31.03

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 การเปลี่ยนแปลงประชากรแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนียบนตัวกรองชีวภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงและความหลากหลายของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย บนตัวกรองชีวภาพในขั้นตอนต่างๆของการทดลองที่ผ่านมา ตั้งแต่การคัดแยกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียประสิทธิภาพสูงจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ การศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ และการทดลองนำตัวกรองชีวภาพมาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งที่มีการจำลองสภาวะคล้ายจริงของระบบบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิดแบบบ่อไร้อินกลางแจ้ง ซึ่งรายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่เก็บตัวอย่างมาสกัดดีเอ็นเอแสดงในตารางที่ 4.12

หลังจากทำการสกัดแยกดีเอ็นเอรวมจากแบคทีเรียที่ติดอยู่บนตัวกรองชีวภาพ ทำการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16S rDNA ด้วยไพรเมอร์ที่จำเพาะกับ AOB และแยกดีเอ็นเอด้วยเทคนิค DGGE ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแถบดีเอ็นเอบน DGGE ในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบชนิดของ AOB บนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อจาก 3 แหล่ง ได้แก่ P S และ CU มีความคล้ายคลึงกัน โดยพบแถบดีเอ็นเอที่เห็นได้ชัดเจนจำนวน 3 แถบ ได้แก่แถบหมายเลข 1 2 และ 9 เมื่อทำการบ่มตัวกรองชีวภาพระยะยาวในห้องปฏิบัติการที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน พบว่าชนิดของ AOB ที่พบบนตัวกรองชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลง โดยแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ไม่มีแอมโมเนีย (C0) มีจำนวนแถบที่มองเห็นได้ 6 แถบ ได้แก่แถบหมายเลข 1 2 7 8 9 และ 10 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียมากขึ้นที่ 2 และ 10 มก. ในโตรเจน/ล. ในตัวอย่าง C2 และ C10 พบว่าปริมาณแอมโมเนียที่มากขึ้นมีผลทำให้ความหลากหลายของ AOB ลดน้อยลง โดยจะมองเห็นแถบดีเอ็นเอได้ชัดเจนเพียง 2 แถบ ได้แก่แถบหมายเลข 2 และ 9 นั่นคือเกิดการคัดเลือกกลุ่มแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพให้คงเหลือเฉพาะชนิดที่ทนความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงได้

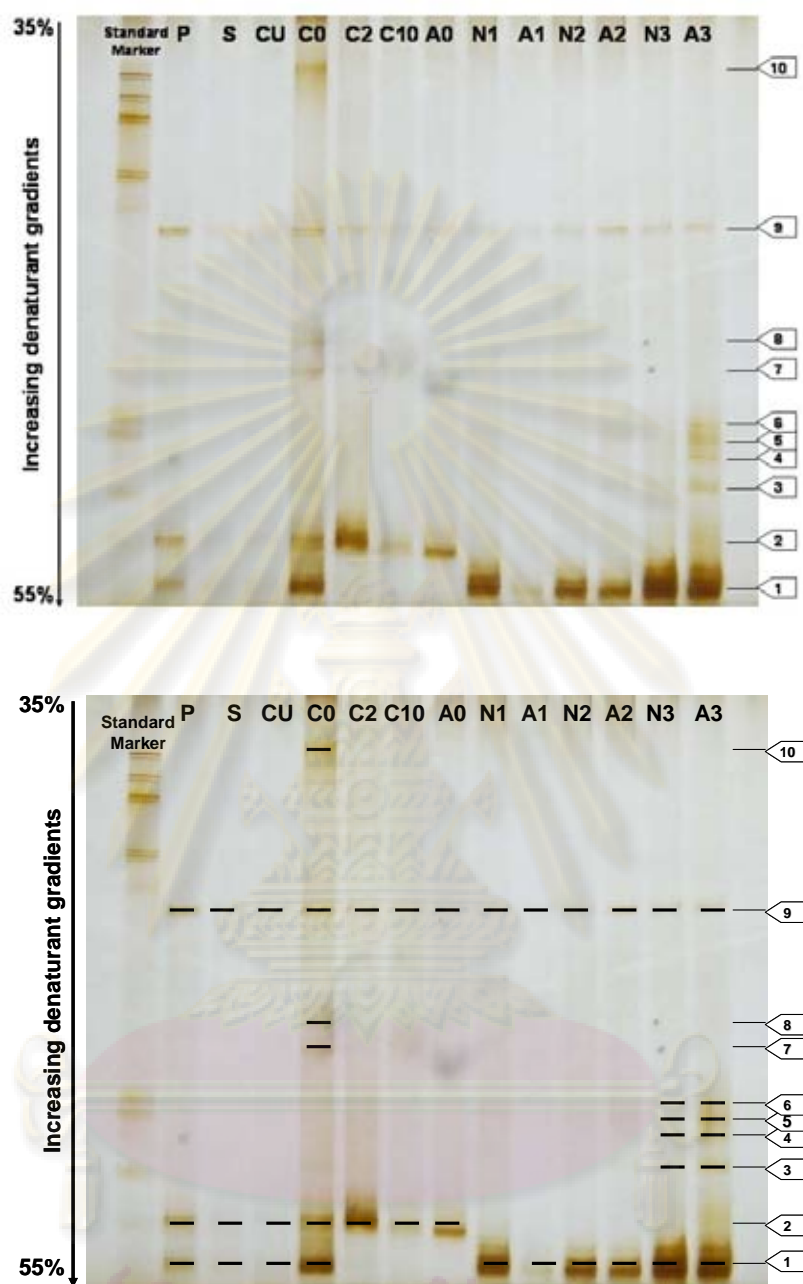
ความหลากหลายของ AOB บนตัวกรองชีวภาพ A0 ซึ่งผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก่อนนำมาทดลองในถังเลี้ยงกุ้ง พบว่ามีแถบดีเอ็นเอที่เห็นได้ชัดจำนวน 2 แถบ ได้แก่แถบหมายเลข 2 และ 9 แต่หลังจากทำการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 30 และ 60 วัน พบว่าแถบดีเอ็นเอมีลักษณะเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน โดยความหลากหลายของ AOB บนตัวกรอง A1 มีการเปลี่ยนแปลงไปจาก A0 คือแถบดีเอ็นเอหมายเลข 2 จะหายไปแต่จะพบแถบหมายเลข 1 ขึ้นมาแทน ในขณะที่แถบที่ 9 ยังคงอยู่ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มประชากร AOB ที่พบบนตัวกรองชีวภาพใหม่ N1 ที่อยู่ในถังเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 1 เดือน พบว่ามีลักษณะแถบและจำนวนเช่นเดียวกับที่พบบน A1 ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า AOB ที่มายึดเกาะและเติบโตอยู่บนผิวของตัวกรองชีวภาพจะเป็นแบคทีเรียที่มีต้นกำเนิดมาจากน้ำในถังเลี้ยงกุ้งเองมากกว่าจากหัวเชื้อที่ตรึงจากห้องปฏิบัติการ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าหัวเชื้อ



AOB เริ่มต้นที่ตรงจากห้องปฏิบัติการจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำมาใช้ในถังเลี้ยงกุ้ง โดย AOB ธรรมชาติที่มีในถังเลี้ยงกุ้งจะเติบโตขึ้นมาทดแทน

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ด้วย เทคนิค PCR-DGGE

ตัวอย่างที่	ชื่อย่อ	รายละเอียดของตัวอย่าง
1	P	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จ.เพชรบุรี
2	S	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จ.ฉะเชิงเทรา
3	CU	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับ ไข่เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4	C0	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วจากถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของ แอมโมเนีย 0 มก./ล.
5	C2	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วจากถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของ แอมโมเนีย 2 มก./ล.
6	C10	ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้วจากถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของ แอมโมเนีย 10 มก./ล.
7	A0	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่าน การตรงหัวเชื้อแล้ว ก่อนการเลี้ยงกุ้ง
8	N1	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการ ใช้งาน ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 30 วัน
9	A1	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่าน การตรงหัวเชื้อแล้ว ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 30 วัน
10	N2	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการ ใช้งาน ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 60 วัน
11	A2	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่าน การตรงหัวเชื้อแล้ว ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 60 วัน
12	N3	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองที่ยังไม่ผ่านการ ใช้งาน ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 90 วัน
13	A3	ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่าน การตรงหัวเชื้อแล้ว ภายหลังจากเลี้ยงกุ้ง 90 วัน



รูปที่ 4.29 จำนวนแถบและการเคลื่อนที่ของดีเอ็นเอบน DGGE ที่สกัดแยกจากแบคทีเรียที่ตรึงบนตัวกรองชีวภาพจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มต่างๆ (P) (S) (CU) ตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. (C0) (C2) (C10) ตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ในเดือนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลอง (N1) (N2) (N3) และตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจาก CU ก่อนเริ่มการทดลอง และเดือนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลอง (A0) (A1) (A2) และ (A3) เมื่อใช้ความเข้มข้นอะคริลาไมด์ 8% และความเข้มข้นยูเรียในช่วง 35-55%

ภายหลังการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าความหลากหลายของ AOB บนตัวกรองชีวภาพ มีเพิ่มมากขึ้น จากจำนวนแถบดีเอ็นเอที่เห็นได้ชัดจากตัวอย่างตัวกรองชีวภาพ N1 A1 (เดือนที่ 1) และ N2 A2 (เดือนที่ 2) จำนวน 2 แถบ คือแถบหมายเลข 1 และ 9 เพิ่มขึ้นเป็น 6 แถบจากตัวกรองชีวภาพ N3 และ A3 ภายหลังการเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 3 เดือน โดยพบแถบที่ 3 4 5 และ 6 เพิ่มขึ้นมา แสดงว่ามี AOB ชนิดใหม่ๆ เพิ่มจำนวนมากขึ้นบนผิวของตัวกรองชีวภาพ โดยที่แบคทีเรียกลุ่มเด่น ยังคงเป็นดีเอ็นเอแถบที่ 1 เช่นเคย จากความหลากหลายของ AOB ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DGGE นั้น จำนวนแถบดีเอ็นเอที่มองเห็นได้ไม่ได้เป็นตัวระบุจำนวนชนิดของแบคทีเรียทั้งหมดที่มีบนตัวอย่าง เนื่องจากอาจมี AOB อีกจำนวนหนึ่งที่มีปริมาณน้อยมากจนไม่แสดงออกให้เห็นเป็นแถบดีเอ็นเอที่ชัดเจน แต่ DGGE จะเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของ AOB ชนิดเด่นที่พบบนตัวกรองชีวภาพ นอกจากนี้วิธีวิเคราะห์ AOB ด้วยไพรมอร์ CTO ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดคือ จะต้องใช้ไพรมอร์เริ่มต้น (Forward primer) จำนวน 2 ชนิดรวมกัน และใช้ไพรมอร์สิ้นสุด (Reverse primer) 1 ชนิด ในการเพิ่มจำนวน AOB ด้วยวิธี PCR ทำให้แถบดีเอ็นเอที่พบของแบคทีเรียแต่ละชนิดอาจมีลักษณะที่ไม่เป็นแถบเดี่ยวที่ชัดเจน (Kowalchuk และคณะ, 1997)

นั่นคือจากผลการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพ สรุปได้ว่าสภาวะการบ่มเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพที่ตรึงห้วเชื้อในห้องปฏิบัติการในระยะยาวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรของ AOB ไปจากเชื้อดั้งเดิม และการตรึงห้วเชื้อแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ เมื่อนำไปใช้กับถังเลี้ยงกุ้งในสภาวะการใช้งานจริง จะพบว่าองค์ประกอบของกลุ่มประชากร AOB เปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นชนิดเดียวกับแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติในถังเลี้ยงกุ้งนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มเพื่อตรึงบนตัวกลางพลาสติกในรูปแบบตัวกรองชีวภาพพร้อมใช้งาน และทำการทดสอบภายใต้สภาวะใช้งานคล้ายจริงของระบบบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิดแบบบ่อไร้นดินกลางแจ้ง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การคัดแยกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 4 แหล่ง ได้แก่ (1) ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2) ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (3) บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งของบรรจงฟาร์ม จ.ฉะเชิงเทรา และ (4) บ่อดินเลี้ยงหอยหวานของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการเพาะเลี้ยงหอยหวาน จ.เพชรบุรี พบว่าหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียสามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ และมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ  $47.20 \pm 1.86$  มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดแอมโมเนียกับตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มอื่นๆ พบว่ามีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

5.1.2 การทดลองบ่มตัวกรองชีวภาพเป็นระยะเวลา 3-6 เดือน ในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ในโตรเจน/ล. พบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียอยู่ในช่วง 30-120 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ตร.ม./วัน และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวกรองและการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ในการบ่มตัวกรองมีผลร่วมกันที่จะทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P = 0.000$ ) โดยการเตรียมตัวกรองชีวภาพด้วยน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ในโตรเจน/ล. ตัวกรองจะมีความสามารถในการบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ได้สมบูรณ์หลังจากการบ่มเชื้อเป็นเวลาประมาณ 150 วัน และการบ่มตัวกรองในน้ำทะเลที่ไม่เติมแอมโมเนียซึ่งมีค่าแอมโมเนียเฉลี่ยต่ำกว่า 0.07 มก.ในโตรเจน/ล. เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าแบคทีเรียบนตัวกรองยังสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ แต่อัตราการบำบัดจะต่ำลงและเป็นกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากการสะสมของไนโตรตในระหว่างการบำบัด

5.1.3 การตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพและนำมาใช้กับถังทดลองเลี้ยงกุ้งขาวขนาด 450 ลิตร และเลี้ยงกุ้งน้ำหนักเฉลี่ย  $7.29 \pm 1.80$  ก./ตัว ด้วยความหนาแน่น 47 ตัว/ตร.ม. เป็นเวลา 90 วัน พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียมาล่วงหน้า (อย่างน้อย 45 วัน) สามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์เฉลี่ย  $0.25 \pm 0.45$  และ  $0.80 \pm 1.32$  มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ไม่ตรึงหัวเชื้อล่วงหน้า และถังชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ พบการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์โดยพบไนไตรต์สูงถึง 16.69 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ตัวกรองชีวภาพยังช่วยให้น้ำมีปริมาณตะกอนแขวนลอยและแพลงก์ตอนพืชน้อยกว่าถังชุดควบคุม การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในระหว่างการเลี้ยงกุ้ง พบว่าตัวกรองชีวภาพมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ  $142.4 \pm 3.2$  มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และกุ้งที่เลี้ยงในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดสูงกว่าถังชุดควบคุม

5.1.4 การวิเคราะห์ความหลากหลายของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) ด้วยเทคนิค PCR-DGGE พบว่าการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียในสภาวะห้องปฏิบัติการจะทำให้องค์ประกอบชนิดของ AOB ที่เติบโตบนตัวกรองชีวภาพเปลี่ยนไปจากเดิม โดยมีจำนวนชนิดของ AOB ลดลง และเมื่อทำการตรึงไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกลางพลาสติกและนำไปติดตั้งในถังเลี้ยงกุ้ง พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของ AOB บนตัวกรอง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน ความหลากหลายของ AOB บนตัวกรองจะเปลี่ยนไปจากหัวเชื้อตั้งต้นและพบจำนวนชนิดของ AOB มากขึ้นกว่าเดิม แสดงว่า AOB ชนิดอื่นที่มีอยู่ตามธรรมชาติในน้ำจะเติบโตขึ้นบนตัวกรองชีวภาพได้ ดังนั้นการเตรียมหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียล่วงหน้าก่อนนำมาใช้งานจะช่วยให้ตัวกรองชีวภาพมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียตั้งแต่เวลาเริ่มใช้งานในถังเลี้ยงกุ้ง แต่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งองค์ประกอบชนิดของแบคทีเรียจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเชื้อที่มีอยู่ตามธรรมชาติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดโดยใช้ตัวกรองชีวภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำจะเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่จะเกิดขึ้น และช่วยป้องกันมลพิษทางน้ำก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การใช้กระบวนการทางชีวภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำจะเป็นตัวช่วยในการรักษามูลค่าการส่งออกกุ้งอันเนื่องมาจากการกีดกันทางการค้า และเป็นระบบที่ส่งผลดีต่อการรักษาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางการบำบัดคุณภาพน้ำให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่

5.2.1 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากแหล่งต่างๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียแตกต่างกัน จึงควรมีการศึกษาความหลากหลายของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ทำการตรึงเชื้อและเก็บรักษาชนิดในห้องปฏิบัติการเพื่อนำมาใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นของตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชันต่อไป นอกจากนี้ผลการศึกษานิคของ AOB ชี้ให้เห็นว่าความหลากหลายของไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำมาเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ จึงควรมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาสายพันธุ์ของไนตริไฟอิงแบคทีเรียให้คงความหลากหลายไว้เหมือนกับที่พบตามธรรมชาติ

5.2.2 ควรมีการเปรียบเทียบรูปแบบของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกรองชีวภาพแบบต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับสภาวะของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยควรเลือกวัสดุที่มีความทนทาน ดูแลรักษาง่าย มีพื้นที่ผิวมาก มีราคาไม่แพง และคงสภาพอยู่ในระบบได้นาน

5.2.3 การศึกษาความหลากหลายของไนตริไฟอิงแบคทีเรียในการศึกษานี้ทำได้เพียงแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (AOB) เท่านั้น เนื่องจากกระบวนการศึกษาแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนโตรเจน (NOB) ด้วยเทคนิค PCR-DGGE ยังไม่สามารถทำได้จากข้อจำกัดด้านข้อมูลทางชีววิทยาระดับโมเลกุลของแบคทีเรียกลุ่มนี้ ในอนาคตหากไม่มีข้อจำกัดนี้ก็ควรมีการศึกษาแบคทีเรียกลุ่ม NOB ให้มากขึ้น เนื่องจากการสะสมของไนโตรเจนเป็นปัญหาที่พบมากและมีความสำคัญอย่างยิ่งกับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อไร้อินกลางแจ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกศริน ทีมาอยู่ และศิริวรรณ คิดประเสริฐ. การบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งโดยใช้สาหร่ายทะเล  
สกุลกราซิลาเรียลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจน. ในรายงานการประชุมสัมมนาทาง  
วิชาการสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 14, หน้า 1-10. 26-29 มกราคม 2540 ณ  
โรงแรมพาวิลเลียนและวิทยาเขตภาคใต้ จังหวัดสงขลา.
- คณิต ไชยคำ และขงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. แนวทางการป้องกันเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อ  
สิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ  
ชายฝั่งสงขลา. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2537.
- ชลอ ลีมสุวรรณ. กัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ฐานเศรษฐกิจ, 2535.
- ชลอ ลีมสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชกุล. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย.  
กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2547.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุน. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:  
สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2535.
- ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ  
(*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- นภาพร กิตติมศักดิ์. การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มี  
ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอคริมและแบบได้น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2541.
- พุทธ ส่องแสงจินดา, ชัชวาล อินทรมนตรี และลักขณา ตะอองศิริวงศ์. หลักของสารประกอบ  
ไนโตรเจนที่ผิวสัมผัสของน้ำ-ตะกอนในบ่อเลี้ยงกุ้ง. เอกสารประกอบการประชุมกุ้งทะเล  
แห่งชาติ ครั้งที่ 1 กรมประมง, 2544.
- พุทธ ส่องแสงจินดา. การจัดการสารประกอบไนโตรเจนในฟาร์มเลี้ยงกุ้งระบบปิด,  
[ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: [http://www.allvetgroup.com/KungThai/con\\_detail.php](http://www.allvetgroup.com/KungThai/con_detail.php) [15  
พฤศจิกายน 2549]
- มะลิวัลย์ กุตะโล, นุปลา ศรีสัมฤทธิ์, จันทิมา อานทอง, สรวีศ เผ่าทองสุข และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต.  
การใช้ตัวกรองชีวภาพในตริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนในถังเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง.  
วารสารวิจัยสถานะแวดล้อม 29(2550) : 23-45.

- มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อ  
เลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- รตีวรรณ อ่อนรัมย์, ธีรพงษ์ ธีรมนต์, ดนัย บวรเกียรติกุล และระจฤดี โชติกาวิรินทร์. การบำบัดน้ำทิ้ง  
จากนาุ้งด้วยระบบบำบัดแบบชีววิทยา. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา,  
2541.
- สุทธสินี อ่วมจันทร์. การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มแบคทีเรียในตัวกรองชีวภาพแบบไนตริฟิเคชันและดี  
ไนตริฟิเคชันสำหรับเพาะเลี้ยงทางน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- สรวิศ เผ่าทองสุข, สุทธิกาญจน์ สุทธิ, จันทรวงศ์ งามพ่องใส, ชมพูนุช ชัยรัตน์, สมเกียรติ ปิยะธีร-  
ธิตีวรกุล และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. การทดสอบประสิทธิภาพของการเลี้ยงกุ้งระบบปิดที่มี  
การควบคุมคุณภาพน้ำด้วยระบบกรองชีวภาพภายในบ่อ. ศูนย์พันธุวิศวกรรมและ  
เทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, 2547.
- สรรเสริญ ช่อเจียง, จำริญศรี พวงแก้ว และจوزهดี พงศ์มนิรัตน์. ประสิทธิผลของการเลี้ยงกุ้งขาว  
แวนนาไมผสมผสานกับกุ้งกุลาดำในบ่อดิน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 22, ศูนย์วิจัยและพัฒนา  
ประมงชายฝั่งนครศรีธรรมราช, 2551.
- สิริ ทุกข์วินาศ และชนินทร์ แสงรุ่งเรือง. การศึกษาวิจัยบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบ  
พัฒนาด้วยระบบตัวกรองชีวภาพ. วารสารการประมง 51(2541) : 535-540.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาษาอังกฤษ

- Alhafedh, S. Y., Alam, A. and Alam A, M. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacultural Engineering 29 (2003) : 139-154.
- Anthonised, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S. and Srinath. E. G. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. Journal Water Pollution Control Federation 48 (1976) : 835-852.
- APHA. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. Maryland : Victor Graphics, 1992.
- Avnimelech, Y. and Ritvo, G. Shrimp and fish pond soils: processes and management. Aquaculture 264 (2003) : 140-147.
- Azim, E. M. and Little, C. D. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture 283 (2008) : 29-35.
- Balcazar, L. J., Lunab, R. T. and Cunningham, P. D. Effect of the addition of four potential probiotic strains on the survival of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) following immersion challenge with *Vibrio parahaemolyticus*. Invertebrate Pathology 96 (2007) : 147–150.
- Bitton, G. B. Wastewater microbiology. New York: John Willey & Son, 1994.
- Boyd, C. E. Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering 18 (1998) : 9-40.
- Brazil, B. L. Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering 34 (2006) : 261-274.
- Chen, K. C., Lee, S. C., Chin, S. C. and Houg, J. Y. Simultaneous carbon–nitrogen removal in wastewater using phosphorylated PVA-immobilized microorganisms. Enzyme and Microbial Technology 23 (1998) : 311–320.
- Chen, S., Ling, J. and Blancheton, P. J. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. Aquacultural Engineering 34 (2006) : 179-197.
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. Aquaculture 270 (2007) : 1–14.

- Eding, H. E., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, A. E. and Klapwijk, A. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering* 34 (2006) : 234–26.
- Erlor, D., Pollard, P. and Knibb, W. Effects of secondary crops on bacterial growth and nitrogen removal in shrimp farm effluent treatment systems. *Aquacultural Engineering* 30 (2004) : 103–114.
- Golz, W. J. Biological Treatment in Recirculating Aquaculture Systems. in the classroom: a training workshop for agricultural science teachers, 6-7 December 1995 at Louisiana Sea Grant College Program, Louisiana State University.
- Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhaedt, M. *Methods of Seawater Analysis*. 3<sup>rd</sup> ed. Weinheim : Wiley-vch, 1999.
- Greiner, D. A. and Timmons, B. M. Evaluation of the nitrification rates of microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility. *Aquacultural Engineering* 18 (1998) : 189–200.
- Grommen, R., Hauteghem, I. V., Wembeke, M. V. and Verstraete, W. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite in fresh water aquaria system. *Aquaculture* 211 (2002) : 115-124.
- Grommen, R., Dauw, L. and Verstraete, W. Elevated salinity selects for a less diverse ammonia-oxidizing population in aquarium biofilters. *FEMS Microbiology Ecology* 52 (2005) : 1-11.
- Grossa, A., Nemirovskya, A., Zilbergb, D., Khaimova, A. B., Snird, E., Ronena, Z. and Nejidata, A. Soil nitrifying enrichments as biofilter starters in intensive recirculating saline water aquaculture. *Aquaculture* 223 (2003) : 51–62.
- Hagopian, D. S. and Riley, J. G. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* 18 (1998) : 223–244.
- Hargreaves, J. A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture* 166 (1998) : 181-212.
- Hargreaves, A. J. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34 (2006) : 344-363.
- Hart, P. and O'sullivan, D. *Recirculation system: Design, construction and management*. Australia: Turtle Press Pty, 1993.

- Hochheimer, J. N. Trickling filter model for closed system aquaculture. Unpublished Dissertation. University of Maryland, College Park, Maryland, 1990.
- Hockenbury, M. R. and Grady, L. P. C. Inhibition of Nitrification-Effects of Selected Organic Compounds. Journal water Pollution Control Federation 49 (1977) : 768.
- Kamstra, A., Vanderheul, J. W. and Nijhof, M. Performance and optimisation of trickling filters on eel farms. Aquacultural engineering 17 (1998) : 175-192.
- Kowalchuk, G. A., Stephen, J. R., Deboer, W., Prosser, J. I., Embley, T. M. and Woldendorp, J. W. Analysis of L-proteobacteria ammonia-oxidizing bacteria in coastal sand dunes using denaturing gradient gel electrophoresis and sequencing of PCR amplified 16S rDNA fragments. Appl. Environ. Microbiol 63 (2006) : 1489-1497.
- Lawson, T. B. Fundamentals of aquacultural engineering. New York : Chapman & hall, 1995.
- Lekang, O. I. and Kleppe, H. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. Aquacultural Engineering 21 (2000) : 181-199.
- Leonard, N., Blancheton, J. P. and Guiraud, J. P. Populations of Heterotrophic bacteria in an experimental recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering 22 (2000) : 109-120.
- Logemann, S., Schantl, J., Bijvank, S., Loosdrecht, V. M., Kuenen, G. J. And Jetten, M. Molecular microbial diversity in a nitrifying reactor system without sludge retention. FEMS Microbiology Ecology 27 (1998) : 239-249.
- Lyssenko, C. and Wheaton, F. Impact of positive ramp short-term operating disturbances on ammonia removal by trickling and submerged-upflow biofilters for intensive recirculating aquaculture. Aquacultural Engineering 35 (2006) : 26-37.
- Michaud, L., Blancheton, J. P., Bruni, V. and Piedrahita, R. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. Aquacultural Engineering 34 (2006) : 224-233.
- Miller, G. E. and Libey, G. S. Evaluation of three biological filters suitable for aquaculture applications. World Maric. Soc 16 (1985) : 158-168.
- Mishra, K. J., Samocha, M. T., Patnaik, S., Speed, M., Gandy, L. R. and Ali, M. A. Performance of an intensive nursery system for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited discharge condition. Aquacultural Engineering 38 (2008) : 2-15.
- Muir, P. R., Sutton, D. C. and Owens, L. Nitrate toxicity to *Penaeus monodon* protozoa. Mar. Bio 108 (1991) : 67-71.

- Nijhof, M. and Bovendeur, J. Fixed film nitrification characteristics in seawater recirculation fish culture systems. Aquaculture 87 (1990) : 133–143.
- Pollard, P. C. A quantitative measure of nitrifying bacteria growth. Water research 40 (2006) : 1569-1576.
- Prosser, J. J. Nitrification. Oxford : IOR Press, 1986.
- Ruiz, G., Jeison, D., Rubilar, O., Ciudad, G. and Chamy, R. Nitrification–denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewaters. Bioresource Technology 97 (2006) : 330–335.
- Sandu, I. S., Boardman, D. G., Watten, J. B. and Brazil, L. B. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium. Aquacultural Engineering 26 (2002) : 41–59.
- Satoh, H., Okabe, N. and Watanabe, Y. Significance of substrate C/N ratio on structure and activity of nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. Water Science Technology 41 (2000) : 317–321.
- Schryver, D. P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. and Verstraete, W. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture 277 (2008) : 125-137.
- Schnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dafni, Z. and Rijn, J. V. Design and performance of zero-discharge tilapia recirculating system. Aquacultural engineering 26 (2002) : 191-203.
- Sesuk, T., Powtongsook, S. and Nootong, K. Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying biofilters. Bioresource Technology 100 (2009) : 2088-2094.
- Shan, H. and Obbard, J. P. Ammonia removal from prawn aquaculture water using immobilized nitrifying bacteria. Applied Microbiology and Biotechnology 57(2001) : 791-798.
- Shan, H. and Obbard, J. P. Ammonia removal from freshwater using nitrifying bacteria enriched from a seawater aquaculture pond. Biotechnology 25(2003) : 1469-1471.
- Silapakul, S., Powtongsook, S. and Pavasant, P. Nitrogen Compounds Removal in a Packed Bed External Loop Airlift Bioreactor. Korean Journal of Chemical Engineering 22 (2005) : 393-398.
- Skinner, F. A. and N. Walker. Growth of *Nitrosomonas europaea* in Batch and Continuous Culture. Archives Mikrobiology 38 (1961) : 339.

- Skjolstrup, J., Nielsen, H. P., Frier, O. J. and Mclean, E. Performance characteristics of fluidised bed biofilters in a novel laboratory-scale recirculation system for rainbow trout: nitrification rates, oxygen consumption and sludge collection. Aquacultural Engineering 18 (1998) : 265–276.
- Soderberg, W. R. Flowing water fish culture. Florida : Lewis Publishers, 1995.
- Spotte, S. Seawater aquariums the captives environment. New York : John Wiley & Sons, 1979.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. A practical handbook of seawater analysis. 2<sup>nd</sup> ed. Ottawa : Fisheries research board of Canada, 1972.
- Summerfelt, S. T. Design and management of conventional fluidized-sand biofilters. Aquacultural engineering 34 (2006) : 275–302.
- Tal, Y., Watt, E. M. J., Schreier, B. S., Sowers, R. K. and Schreier, J. H. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. Aquaculture 215 (2003) : 187–202.
- Tchobanoglous, G., Burton, L. F. and Stensel, D. H. Wastewater engineering treatment and reuse. 4<sup>th</sup> ed. New York : McGraw-Hill, 2004.
- Timmon, M. B. and Losordo, T. M. Aquaculture water reuse system: Engineering design and management. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. Recirculating aquaculture systems. 2<sup>nd</sup> edition. : NRAC Publication, 2002.
- Timmons, M. B., Holder, J. L. and Ebeling, J. M. Application of microbead biological filters. Aquacultural engineering 34 (2006) : 332-343.
- Tookwinas, S. Closed-recirculating shrimp farming system. In: State-of-the-art series . Southeast Asian Fisheries Development Center. Association of Southeast Asian Nations, (2000): 1-27.
- Tseng, K. F., Su, H. M. and SU, M. S. Culture of *Penaeus monodon* in a recirculating system. Aquaculture Engineering 17 (1998) : 138-147.
- Tseng, K. F. and Wu, K. L. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system. Aquacultural Engineering 31(2004) : 17–30.
- U.S. EPA. Manual Nitrogen Control. Washington DC : Office of Research and Development, 1993.

- Vadivelu, V. M., Keller, J. and Yuan, Z. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched Nitrobacter culture. Water Research 41 (2007) : 826–834.
- VanRijn, J., Shilo, M., Bejerano, T. and Nizan, S. The effect of inorganic nitrogen on microorganisms and fish in fishponds. In: Sarig, S., and Rosenthal, H. (Eds), Research in Modern Aquaculture. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Status Seminar held from April 27 to May 1 1990, Plaza Hotel, Tiberias, Israel, under the auspices of the German Israeli Cooperation in Science and Technology. Special Publication of European Aquaculture Society, 11(1990): 3-27.
- Wheaton, W. F. Aquacultural engineering. Canada : Wiley & sons, 1977.
- Whitson, J., Turk, P. and Lee, P. Biological Denitrification in a Closed Recirculating marine culture system. In: Aquaculture Engineering Conference 21-23 June 1994, USA.
- Zhu, S. and Chen, S. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquacultural Engineering 25 (2001) : 1–11.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**

**ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย**

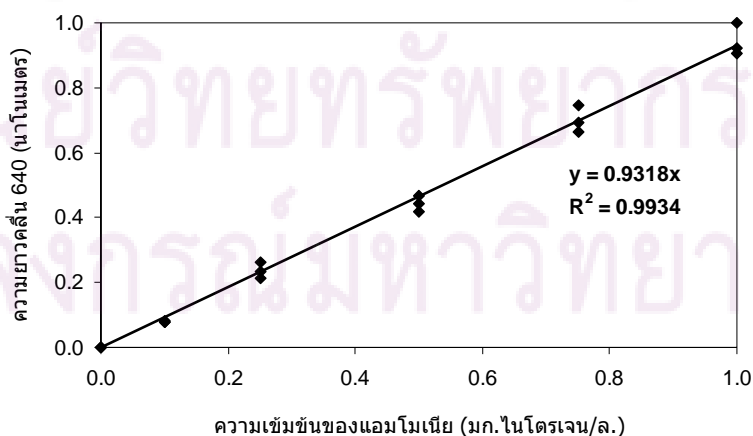
การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (1992) โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างปริมาตร 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ให้ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

- **การเตรียมสารเคมี**

1. สารละลายฟีนอล โดยการละลายฟีนอล 20 ก. ใน 95% เอทิลแอลกอฮอล์ จนได้ปริมาตร 200 มล.
2. สารละลายโซเดียมไนโตรพลาสไซด์ เตรียมโดยละลาย  $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1 ก. ในน้ำ D.I. ปริมาตร 200 มล.
3. สารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ซึ่งเตรียมโดยการผสมอัลคาไลนรีเอเจนต์ (ละลายโซเดียมซิงเตรต 100 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 ก. ในน้ำ D.I. ปริมาตร 500 มล.) กับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (ใช้สารละลายไฮโปคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล) ในอัตราส่วน 100 มล. ต่อ 25 มล.

- **ขั้นตอนการวิเคราะห์**

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายฟีนอลปริมาตร 0.2 มล. และสารละลายโซเดียมไนโตรพลาสไซด์ปริมาตร 0.2 มล. ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายออกซิไดซ์ซิงค์และปิดฝาหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้สารละลายกับน้ำตัวอย่างผสมเข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชม. หลังจากสารทำปฏิกิริยากันแล้วสีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ภายในเวลา 24 ชม. สำหรับ Blank จะใช้น้ำกลั่น (De-ionized water) จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร สำหรับสารละลายแอมโมเนียมาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 0.75, และ 1 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ล. ตามลำดับจากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียเข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนียในโตรเจน/ล.) (กราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย



## ก.2 วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์

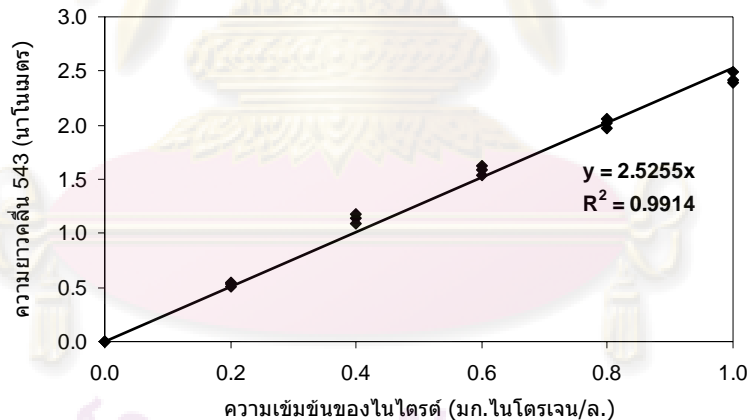
การวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (1992) โดยเก็บน้ำตัวอย่าง 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

### - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลไมด์ เตรียมโดยละลายซัลฟานิลไมด์ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มล. จากนั้นเติมน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล. เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 2-8 นาที
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 ก. ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มล.

### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

เปิดน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง ทำการเติมสารละลายซัลฟานิลไมด์ปริมาตร 0.1 มล. และเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. ปิดหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มแล้วนำไปป็นและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร สำหรับสารละลายไนไตรต์มาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มก.ไนไตรต์ในโตรเจน/ล. ตามลำดับจากสารละลายมาตรฐานไนไตรต์เข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์ในโตรเจน/ล.) (กราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์

### ก.3 วิธีวิเคราะห์ในเตรต

#### - วิธีวิเคราะห์ในเตรตโดยใช้คอลัมน์แคดเมียม

การวิเคราะห์ปริมาณในเตรตในน้ำโดยใช้คอลัมน์แคดเมียมดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (1992) โดยเก็บน้ำตัวอย่าง 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

สำหรับการวิเคราะห์ในเตรตในโตรเจนนี้ได้ดัดแปลงวิธีการนำน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์ที่บรรจุแคดเมียมโดยอาศัยเครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย (peristaltic pump, Master Flex C/L model 77120-60) ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างได้โดยง่าย และลักษณะของคอลัมน์ที่บรรจุเม็ดแคดเมียมจะมีขนาดเล็กกว่าคอลัมน์ที่ใช้ในวิธีมาตรฐาน ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำตัวอย่างที่ต้องใช้ลดลงได้

#### - คอลัมน์บรรจุแคดเมียม

คอลัมน์แคดเมียมนี้สร้างขึ้นจากหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ซม. ยาว 10 ซม. ภายในบรรจุแคดเมียมมีลำสิโรงอยู่ด้านล่างและด้านบนของคอลัมน์ และปลายทั้งสองของคอลัมน์ต่อกับสายซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.2 ซม. เพื่อใช้ในการนำน้ำผ่านและออกจากคอลัมน์ซึ่งติดอยู่กับเครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย

#### - การเตรียมเม็ดแคดเมียม

นำเม็ดแคดเมียม 5 ก. ใส่ลงในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 2% น้ำหนักต่อปริมาตร ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) กวนจนกระทั่งสีน้ำเงินของสารละลายจางลงและเกิดตะกอนสีน้ำตาลแดง ล้างเอาตะกอนสีน้ำตาลแดงออกด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งไม่มีตะกอนสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นจึงนำเม็ดแคดเมียมบรรจุลงในคอลัมน์

#### - การบรรจุเม็ดแคดเมียมลงในคอลัมน์

ใส่สำลีลงไปคอลัมน์และเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางให้เต็มคอลัมน์ จากนั้นนำเม็ดแคดเมียมที่เตรียมใส่ลงในคอลัมน์จนได้ความสูงประมาณ 10 ซม. ต้องระวังไม่ให้คอลัมน์แห้งและไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น ใส่สำลีปิดด้านบนของคอลัมน์ก่อนจะต่อกับสายซิลิโคน นำคอลัมน์ที่บรรจุเม็ดแคดเมียมแล้วต่อเข้ากับเครื่องสูบน้ำชนิดรีดสายแล้วผ่านสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางเข้าสู่คอลัมน์เพื่อให้สารละลายบรรจุอยู่เต็มคอลัมน์และปรับอัตราการไหลที่ระดับ 6-8 มล./นาที่

#### - การล้างแคดเมียม

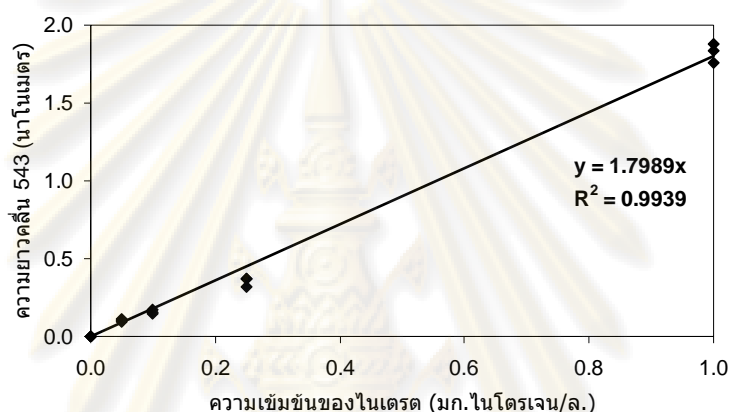
นำเม็ดแคดเมียมที่ผ่านน้ำตัวอย่างมาแล้วออกจากคอลัมน์ ล้างด้วย 2 นอร์มอลไฮโดรคลอริก แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 ก่อนทำการเตรียมแคดเมียมตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว สำหรับการล้างเม็ดแคดเมียมนั้นควรทำเมื่อน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์แล้วประมาณ 30 ตัวอย่าง

#### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์ในเตรตจะใช้น้ำทะเลสังเคราะห์เป็น Blank และใช้น้ำทะเลสังเคราะห์ในการเจือจางน้ำตัวอย่างซึ่งการวิเคราะห์จะต้องผ่านคอลัมน์เช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง โดยเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น ( $\text{NH}_4\text{Cl}$  125 ก. ในน้ำกลั่น 500 มล.) 1 มล. ลงในน้ำทะเลตัวอย่าง 50 มล. เขย่าให้เข้ากัน นำน้ำตัวอย่างผ่านคอลัมน์โดยอัตราการไหลที่ระดับ 6-8 มล./นาที่ ทั้งนี้ตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ 15 มล. แล้วเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่าน

คอลัมน์ 25 มล. ก่อนที่จะนำน้ำตัวอย่างต่อไปผ่านคอลัมน์จะต้องนำสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจางผ่านคอลัมน์ 20 มล. ก่อนทุกครั้ง

ปีเปตน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์แล้ว 5 มล. ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีตีปริมาตร 0.1 มล. (วิธีการเตรียมสารเคมีแสดงในหัวข้อ 3.4.2) ปิดหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มแล้วนำไปปั่นและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ซึ่งจะใช้กระดาษกรองที่ผ่านคอลัมน์แล้วเป็น Blank จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร สำหรับสารละลายไนเตรตมาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.25 และ 1 มก.ไนเตรตในโตรเจน/ล. ตามลำดับจากสารละลายมาตรฐานไนเตรตเข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรตในโตรเจน/ล.) (กราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก)

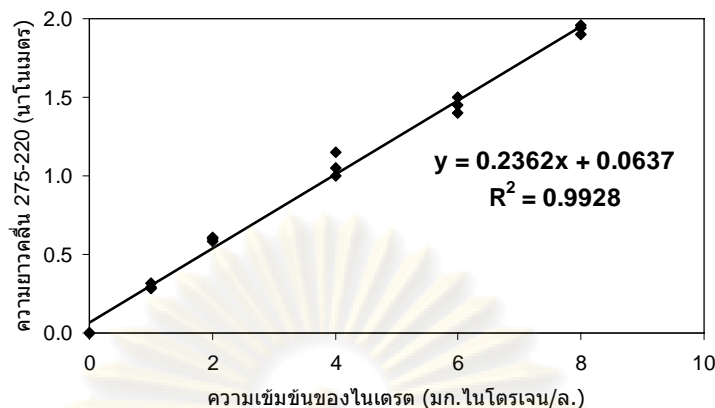


รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรตวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์แคดเมียม

- วิธีวิเคราะห์ไนเตรตโดยวิธี Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method

การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตโดยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก APHA (1992) โดยเก็บน้ำตัวอย่าง 30 มล. จากนั้นทำการกรองน้ำตัวอย่างก่อนที่จะเก็บใส่ภาชนะ ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตในน้ำด้วยวิธีนี้จะทำการวัดตัวอย่างน้ำที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank สำหรับการวัดผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่นจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรตต่อไป ซึ่งค่าที่คำนวณได้ต้องลบด้วยปริมาณไนเตรตซึ่งวิเคราะห์มาจากน้ำตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนเตรตรวมอยู่ด้วยทำให้ปริมาณไนเตรตที่คำนวณได้มีค่ามากเกินไป สำหรับสารละลายไนเตรตมาตรฐานจะเตรียมที่ความเข้มข้น 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 มก.ไนเตรตในโตรเจน/ล. ตามลำดับจากสารละลายมาตรฐานไนเตรตเข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรตในโตรเจน/ล.) (กราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานไนเตรด

#### ก.4 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์ซึ่งดัดแปลงมาจาก Grasshoff (1999) โดยการนำน้ำตัวอย่างปริมาตร 50 มล. บรรจุในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติมออกซิไดซ์ซิงค์รีเอเจนต์ [ละลาย purified potassium peroxodisulphate ( $K_2S_2O_8$ ) 5 ก. และกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.375 โมล/ล. ปริมาตร 100 มล. เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องในขวดพลาสติกที่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม] ปริมาตร 5 มล. ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไป Autoclaved ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีการวิเคราะห์ไนเตรดโดยวิธี Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method

#### ก.5 วิธีวิเคราะห์ความเป็นต่าง

วิธีวิเคราะห์ความเป็นต่างดัดแปลงมาจากวิธีของ ชงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสมน (2535) โดยการนำน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. ซึ่งมี pH probe จุ่มอยู่ จากนั้นนำมาไตเตรดกับ สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมล/ล. จนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งปริมาตรของ กรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรดจะนำไปคำนวณเพื่อหาค่าความเป็นต่าง ดังนี้

$$\text{ความเป็นต่าง} = \frac{\text{ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ไตเตรด (มล.)} \times 1,000 \times 0.01 \text{ (โมล/ล.)} \times 2 \times 50}{\text{ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง (มล.)}}$$

#### ก.6 วิธีวิเคราะห์คลอโรฟิลล์-เอ

การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์-เอ โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิทริก (Spectrophotometric) ดัดแปลงมาจากวิธีของ Strickland และ Parson (1972) โดยการกรองน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. ผ่านกระดาษกรองที่มีรูขนาด 0.5 นาโนเมตร ขณะกรองเติมสารละลายแมกนีเซียมคาร์บอเนต 2-3 หยด จากนั้นนำแผ่นกรองที่ได้ไปสกัดคลอโรฟิลล์ หากไม่สามารถทำให้แห้งแผ่นกระดาษกรองแล้วห่อด้วยกระดาษอลูมิเนียม แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเก็บตัวอย่างไว้ได้ 2-3 สัปดาห์ เมื่อต้องการวิเคราะห์นำแผ่นกระดาษกรองมาบดด้วยเครื่องบดเนื้อเยื่อ (Tissue grinder) โดยก่อนบดให้เติมสารละลายอะซิโตน 90% พอประมาณ (เพื่อให้คลอโรฟิลล์ละลาย

ออกมามากที่สุดตั้งทิ้งไว้ 10 นาที) แล้วบดจนแผ่นกรองละเอียด จากนั้นเทสารละลายที่ได้ลงในหลอดฝาเกลียว ปรับปริมาตรให้ได้ 5-10 มล. ด้วยอะซิโตน 90% นำไปเก็บในที่มืดอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำสารละลายที่อยู่ในหลอดเกลียวมาปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ด้วยความเร็ว 4000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที โดยนำสารละลายส่วนใสมาวัดปริมาตรที่แน่นอนแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750, 663, 645 และ 630 นาโนเมตร สำหรับ Blank จะใช้สารละลายอะซิโตนความเข้มข้น 90% วัดที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ซึ่งการคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ (ไมโครกรัม/ล.) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{คลอโรฟิลล์เอ} = \frac{[11.64(A-663)-2.16(A-645)+0.10(A-630)] \times \text{ปริมาตรอะซิโตนที่ใช้สกัด(มล.)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (ล.)}}$$

#### ก.7 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

ก่อนการทดลองต้องเตรียมกระดาษกรองโดยการนำมาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ นำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรอง ซึ่งต้องจดปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่กรองไว้ จากนั้นนำกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้อบจะนำมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระดาษกรองเย็นลง จากนั้นนำกระดาษกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ (มก./ล.) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{\text{นน.กระดาษกรองหลังกรองน้ำ} - \text{นน.กระดาษกรองก่อนกรองน้ำ} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (มล.)}}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

จากการทดลองที่ 4.1 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน และคุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.1

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
25/7/50	0	2.74	0.10	0.02	0.01	0.60	0.11
26/7/50	16	2.46	0.07	0.01	0.00	0.43	0.21
26/7/50	24	2.85	0.06	0.01	0.00	0.53	0.02
27/7/50	41	1.90	0.39	0.03	0.05	0.45	0.04
28/7/50	66.5	2.56	0.36	0.01	0.01	0.40	0.14
29/7/50	88	1.84	0.32	0.00	0.00	0.38	0.02
30/7/50	113	2.08	0.23	0.01	0.00	0.32	0.14
31/7/50	138	1.09	0.19	0.01	0.00	0.12	0.02
1/8/50	158.5	0.83	0.24	0.03	0.00	0.25	0.05
2/8/50	185	0.63	0.16	0.05	0.01	0.32	0.08
2/8/50	193	0.59	0.19	0.06	0.02	0.26	0.24
3/8/50	208	0.47	0.15	0.06	0.03	0.42	0.12
4/8/50	233	0.38	0.17	0.04	0.02	0.70	0.07
5/8/50	259	0.07	0.02	0.02	0.01	1.73	0.34
6/8/50	279	0.05	0.02	0.01	0.00	1.57	0.06
6/8/50	288	0.03	0.01	0.00	0.00	1.56	0.03
7/8/50	305	0.02	0.01	0.02	0.01	2.45	1.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากถังบำบัดน้ำคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3/8/50	0	2.74	0.08	0.02	0.00	0.65	0.22
4/8/50	25	2.01	0.18	0.06	0.00	0.33	0.10
5/8/50	51	2.03	0.22	0.10	0.01	0.41	0.05
6/8/50	71	1.98	0.34	0.13	0.01	1.06	0.05
7/8/50	97	1.91	0.10	0.16	0.01	1.04	0.02
8/8/50	119.5	1.71	0.08	0.18	0.00	1.04	0.16
9/8/50	144	1.54	0.22	0.20	0.01	1.13	0.06
10/8/50	167.5	1.24	0.10	0.21	0.02	1.15	0.05
11/8/50	195	1.09	0.11	0.24	0.03	1.11	0.05
12/8/50	218.8	1.02	0.08	0.30	0.05	1.20	0.07
13/8/50	242	0.80	0.12	0.41	0.08	1.17	0.03
14/8/50	265	0.60	0.15	0.58	0.11	1.13	0.12
15/8/50	288	0.31	0.16	0.73	0.16	1.25	0.08
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งของบรรองฟาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
19/7/50	0	0.46	0.15	0.23	0.01	0.29	0.17
20/7/50	16	5.95	0.92	0.68	0.24	1.13	0.11
20/7/50	23	7.22	2.14	1.09	0.16	1.10	0.00
21/7/50	39	7.07	2.05	1.72	0.37	1.39	0.24
21/7/50	46	8.48	1.77	1.84	0.56	0.10	0.00
22/7/50	65	9.34	2.56	2.39	0.90	1.74	0.58
22/7/50	71	9.59	3.37	2.42	0.87	0.10	0.00
23/7/50	88	9.76	4.03	3.38	1.29	0.10	0.00
23/7/50	95	9.59	4.60	3.92	1.45	0.10	0.00
24/7/50	112	8.54	4.71	5.32	1.59	0.10	0.00
24/7/50	120	9.25	5.00	6.45	1.86	1.14	4.07
25/7/50	137	6.46	5.64	8.53	1.52	0.10	0.00
25/7/50	144	7.21	6.70	9.22	2.29	1.03	0.97
26/7/50	160	4.71	3.99	9.00	0.61	2.71	0.90
26/7/50	168	3.58	4.05	10.01	1.39	4.89	0.82
27/7/50	185	1.90	2.21	11.49	1.22	5.05	1.27
28/7/50	210.5	1.79	1.12	9.48	2.03	7.31	0.68
29/7/50	232	1.49	0.34	10.53	3.15	8.02	0.77

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
6/8/50	0	2.49	0.14	0.04	0.00	0.61	0.00
7/8/50	20	4.27	0.31	0.43	0.00	1.11	0.09
8/8/50	42.5	4.46	0.84	0.80	0.08	0.94	0.06
9/8/50	67	5.01	1.30	0.76	0.07	2.00	0.26
10/8/50	90.5	4.30	1.37	2.06	0.10	2.38	0.71
11/8/50	118	2.55	1.40	2.18	0.03	4.82	1.07
12/8/50	142.25	1.15	1.04	2.31	0.05	5.91	0.51
13/8/50	165	0.22	0.21	7.31	0.33	2.28	0.96
14/8/50	188	0.06	0.01	8.19	0.44	1.96	0.37
15/8/50	211	0.04	0.00	8.36	0.13	1.82	0.67

ตารางที่ ข-2 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนไตรไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.1

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย				
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.20	7.44	32.00	27.00
ก่อนตรวจวัด (2)	5.90	7.43	30.00	27.00
ก่อนตรวจวัด (3)	5.90	7.44	30.00	27.00
หลังตรวจวัด (1)	5.20	7.41	39.00	26.80
หลังตรวจวัด (2)	5.00	7.43	35.00	26.80
หลังตรวจวัด (3)	5.00	7.41	34.00	26.80
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากถังบำบัดน้ำคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา				
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	4.60	7.45	32.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (2)	4.70	7.43	33.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (3)	4.70	7.49	35.00	28.50
หลังตรวจวัด (1)	4.90	7.60	40.00	28.00
หลังตรวจวัด (2)	5.20	7.56	35.00	28.00
หลังตรวจวัด (3)	5.00	7.57	33.00	28.00



ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื่อมจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งของบรรมจฟาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา				
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.40	6.81	29.00	27.10
ก่อนตรวจวัด (2)	5.30	6.73	29.00	27.10
ก่อนตรวจวัด (3)	5.20	6.74	29.00	27.10
หลังตรวจวัด (1)	2.70	6.80	35.00	28.50
หลังตรวจวัด (2)	5.00	6.56	34.00	28.50
หลังตรวจวัด (3)	3.90	6.77	30.00	28.50
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื่อมจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี				
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.60	7.29	34.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (2)	5.60	7.29	34.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (3)	5.60	7.29	34.00	28.50
หลังตรวจวัด (1)	5.00	7.28	35.00	28.00
หลังตรวจวัด (2)	4.60	7.32	32.00	28.00
หลังตรวจวัด (3)	5.10	7.26	30.00	28.00

ตารางที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื่อมในตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 จากการทดลองที่ 4.1.2

ตัวกรองชีวภาพจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัปดาห์ที่ 2							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนโตรคค์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
8/11/50	0	3.64	0.35	0.04	0.01	16.20	0.01
9/11/50	24	2.00	1.15	1.79	0.78	16.06	0.53
10/11/50	51	0.32	0.50	3.37	0.53	20.36	0.33
11/11/50	72	0.01	0.00	3.52	0.12	19.35	1.02
12/11/50	99.5	0.02	0.00	3.00	0.68	19.46	2.32
13/11/50	119.5	0.01	0.01	3.65	0.15	21.23	1.31

ตัวกรองชีวภาพจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัปดาห์ที่ 4							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
22/11/50	0	3.68	0.16	0.06	0.01	13.43	0.70
22/11/50	4.5	3.43	0.21	0.48	0.20	14.30	1.09
22/11/50	8	3.57	0.72	0.95	0.28	13.12	0.93
23/11/50	24.5	0.68	0.76	2.98	0.97	13.76	0.04
23/11/50	28	0.46	0.68	2.60	0.67	13.21	0.45
23/11/50	33	0.30	0.49	2.59	0.56	12.89	0.29
24/11/50	49	0.04	0.03	2.88	0.04	11.52	0.69
24/11/50	53.5	0.02	0.02	2.74	0.16	11.90	0.59
ตัวกรองชีวภาพจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัปดาห์ที่ 6							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
6/12/50	0	5.39	0.00	0.09	0.00	2.15	0.00
6/12/50	6.5	3.95	0.38	0.26	0.13	2.20	0.12
7/12/50	22	2.97	0.87	1.02	0.67	2.07	0.11
7/12/50	29	1.63	0.73	1.33	1.02	1.74	0.15
8/12/50	45.5	1.06	1.52	1.95	1.20	2.67	0.12
8/12/50	54.5	0.54	0.84	2.18	1.14	2.04	0.47
9/12/50	70.5	0.54	0.89	1.62	0.81	2.96	0.22
9/12/50	78.5	0.45	0.74	1.66	0.59	3.06	0.43
10/12/50	95.5	0.29	0.50	1.26	0.37	3.48	0.88
10/12/50	102.5	0.32	0.49	1.22	0.60	3.38	0.73
ตัวกรองชีวภาพจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัปดาห์ที่ 8							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
19/12/50	0	3.65	0.00	0.06	0.00	2.17	0.00
19/12/50	5	2.73	0.30	0.18	0.10	2.44	0.10
20/12/50	17	2.30	0.49	0.60	0.50	2.07	0.39
20/12/50	21	2.15	0.91	0.83	0.63	2.85	0.17
20/12/50	27	1.73	1.17	1.29	0.83	2.47	0.13
21/12/50	42	0.66	0.62	1.53	0.61	2.72	0.68
21/12/50	47	0.42	0.53	1.55	0.93	2.98	1.21
22/12/50	66	0.15	0.18	1.10	0.94	3.89	1.24
22/12/50	71	0.08	0.11	1.68	1.31	3.06	1.43
23/12/50	90	0.00	0.00	1.65	1.26	3.28	1.27

ตารางที่ ข-4 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 จากการทดลองที่ 4.1.2

ตัวกรองชีวภาพจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา สัปดาห์ที่ 2							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
8/11/50	0	3.64	0.35	0.04	0.01	16.20	0.01
9/11/50	24	2.61	0.24	0.74	0.19	16.37	0.47
10/11/50	51	0.78	0.50	2.23	0.12	18.46	3.30
11/11/50	72	0.07	0.08	3.06	0.15	19.57	1.27
12/11/50	99.5	0.02	0.01	2.90	0.71	19.36	4.02
ตัวกรองชีวภาพจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา สัปดาห์ที่ 4							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
22/11/50	0	2.97	0.20	0.06	0.01	12.82	0.67
22/11/50	4.5	2.96	0.17	0.13	0.02	13.03	0.55
22/11/50	8	3.45	0.15	0.20	0.05	15.15	0.54
23/11/50	24.5	2.39	0.35	0.88	0.36	14.21	0.41
23/11/50	28	2.08	0.35	0.61	0.18	12.52	0.35
23/11/50	33	1.89	0.52	0.76	0.28	11.36	1.89
24/11/50	49	0.74	0.41	1.75	0.42	9.42	2.04
24/11/50	53.5	0.56	0.37	2.10	0.46	10.11	0.86
25/11/50	69	0.09	0.11	2.49	0.52	9.40	2.19
25/11/50	79	0.02	0.01	2.94	0.52	9.96	1.60
ตัวกรองชีวภาพจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับผู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา สัปดาห์ที่ 6							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
6/12/50	0	5.39	0.00	0.09	0.00	2.15	0.00
6/12/50	6.5	4.47	0.17	0.15	0.02	2.27	0.04
7/12/50	22	4.93	0.63	0.43	0.12	2.14	0.05
7/12/50	29	2.90	0.21	0.60	0.15	2.18	0.02
8/12/50	45.5	2.13	0.09	1.19	0.13	2.42	0.07
8/12/50	54.5	1.89	0.14	1.51	0.18	1.99	0.10
9/12/50	70.5	0.32	0.15	2.40	0.37	2.20	0.11
9/12/50	78.5	0.16	0.13	2.98	0.33	2.13	0.12
10/12/50	95.5	0.01	0.01	2.99	0.16	2.29	0.13

ตัวกรองชีวภาพจากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา สัปดาห์ที่ 8							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
19/12/50	0	3.65	0.00	0.06	0.00	2.17	0.00
19/12/50	5	2.98	0.19	0.28	0.04	2.34	0.01
20/12/50	17	2.56	0.23	1.18	0.20	2.06	0.05
20/12/50	21	1.90	0.07	1.26	0.61	2.73	0.32
20/12/50	27	1.29	0.29	2.33	0.28	2.08	0.07
21/12/50	42	0.04	0.03	2.95	0.20	2.15	0.17
21/12/50	47	0.01	0.01	2.87	0.31	2.31	0.30
22/12/50	66	0.02	0.01	2.08	0.59	3.02	0.48
22/12/50	71	0.00	0.00	1.67	0.77	3.38	0.70
23/12/50	90	0.00	0.00	1.39	1.13	3.73	1.03

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัว  
เชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.3

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
23/11/51	0	2.67	0.06	0.00	0.00	1.55	0.02
24/11/51	14	1.19	0.07	0.03	0.00	2.06	0.07
24/11/51	23.5	0.61	0.18	0.04	0.00	2.01	0.13
25/11/51	40	0.28	0.04	0.06	0.00	2.18	0.03
25/11/51	50	0.26	0.05	0.08	0.02	1.89	0.20
26/11/51	62	0.19	0.05	0.07	0.01	2.85	0.12
26/11/51	72	0.16	0.05	0.07	0.01	2.71	0.48
27/11/51	87	0.12	0.04	0.10	0.03	2.37	0.11
28/11/51	111	0.08	0.03	0.10	0.04	2.60	0.04
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งของบรรจพาร์ม จังหวัดฉะเชิงเทรา							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
23/11/51	0	2.51	0.13	0.00	0.00	1.55	0.02
24/11/51	14	1.29	0.21	0.03	0.00	1.76	0.07
24/11/51	23.5	0.88	0.07	0.05	0.01	1.82	0.09
25/11/51	40	0.49	0.06	0.07	0.01	2.16	0.09
25/11/51	50	0.46	0.06	0.12	0.02	2.61	0.80
26/11/51	62	0.42	0.05	0.12	0.04	2.52	0.23
26/11/51	72	0.39	0.05	0.11	0.01	1.99	0.52
27/11/51	87	0.32	0.04	0.20	0.02	2.14	0.13
28/11/51	111	0.22	0.02	0.26	0.04	2.08	0.06
29/11/51	140	0.17	0.01	0.36	0.08	2.39	0.16
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21/10/51	0	2.95	0.34	0.05	0.00	1.38	0.03
22/10/51	26	1.98	0.36	0.12	0.01	1.53	0.15
23/10/46	50	1.10	0.23	0.25	0.03	1.45	0.08
24/10/51	74	0.17	0.04	0.45	0.11	2.00	0.22
25/10/51	99	0.28	0.12	0.64	0.20	2.07	0.10
26/10/51	123	0.05	0.08	0.80	0.23	2.49	0.34

ตารางที่ ข-6 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากการทดลองที่ 4.1.3

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.20	7.44	100.00	32.00	27.00
ก่อนตรวจวัด (2)	5.90	7.43	110.00	30.00	27.00
ก่อนตรวจวัด (3)	5.00	7.41	110.00	34.00	26.80
หลังตรวจวัด (1)	5.20	6.97	90.00	30.00	27.80
หลังตรวจวัด (2)	5.34	6.84	100.00	30.00	27.80
หลังตรวจวัด (3)	5.40	6.55	100.00	33.00	27.90
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงกุ้งของบรรมจฟาร์ม จังหวัดระยอง					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.40	6.81	100.00	29.00	27.10
ก่อนตรวจวัด (2)	5.30	6.73	100.00	29.00	27.10
ก่อนตรวจวัด (3)	3.90	6.77	100.00	30.00	28.50
หลังตรวจวัด (1)	5.50	6.54	80.00	29.00	28.10
หลังตรวจวัด (2)	5.35	6.55	70.00	29.00	28.20
หลังตรวจวัด (3)	5.50	6.70	80.00	29.00	28.10
ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากบ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ก่อนตรวจวัด (1)	5.60	7.29	110.00	34.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (2)	5.60	7.29	110.00	34.00	28.50
ก่อนตรวจวัด (3)	5.10	7.26	90.00	30.00	28.00
หลังตรวจวัด (1)	5.43	7.11	100.00	32.00	28.20
หลังตรวจวัด (2)	5.12	7.02	90.00	32.00	28.20
หลังตรวจวัด (3)	5.20	7.15	80.00	31.00	28.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

จากการทดลองที่ 4.2 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์บ่มตัวกรองชีวภาพในความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ ค-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้าและออกจากถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล.

ถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.							
วันที่	วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนโตรค์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
30/6/51	0	0.06	0.00	0.02	0.05	1.21	1.18
7/7/51	8	0.02	0.00	0.04	0.07	1.21	1.06
15/7/51	16	0.02	0.00	0.01	0.02	1.15	1.12
23/7/51	24	0.07	0.00	0.01	0.03	1.13	0.96
7/8/51	38	0.07	1.23	0.07	0.10	1.19	1.18
14/8/51	45	0.00	0.00	0.01	0.06	1.47	1.20
24/8/51	55	0.01	0.00	0.02	0.08	1.27	1.25
8/9/51	70	0.11	0.01	0.06	0.10	1.57	1.27
17/9/51	79	0.46	0.07	0.25	0.17	1.57	1.37
23/9/51	86	0.02	0.09	0.90	0.17	0.87	1.73
6/10/51	100	0.03	0.02	0.01	0.01	2.11	1.71
16/10/51	110	0.02	0.05	0.08	0.02	1.35	1.67
ถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.							
วันที่	วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนโตรค์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
30/6/51	0	0.54	0.22	0.02	0.22	1.39	1.71
7/7/51	8	0.65	0.00	0.04	0.22	1.30	1.27
15/7/51	16	0.67	0.02	0.01	0.24	1.22	1.46
23/7/51	24	0.76	0.00	0.01	0.07	1.06	0.98

ถึงปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.							
วันที่	วันที่ของ การทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนโตรค้ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
30/6/51	0	2.61	0.00	0.01	0.78	1.09	3.53
7/7/51	8	2.36	0.02	0.04	0.19	1.26	3.16
15/7/51	16	2.74	0.01	0.01	0.02	1.14	2.92
23/7/51	24	2.76	0.02	0.01	0.04	1.09	2.11
7/8/51	38	3.13	0.52	0.06	0.17	1.17	1.89
14/8/51	45	2.24	0.06	0.03	0.68	1.74	2.25
24/8/51	55	1.78	0.01	0.24	0.73	1.76	2.70
8/9/51	70	1.91	0.00	0.48	0.29	1.50	2.81
17/9/51	79	1.70	0.02	0.40	0.19	2.60	3.48
23/9/51	86	1.98	0.21	1.38	0.05	0.93	3.30
6/10/51	100	1.05	0.06	1.88	0.05	1.10	3.16
16/10/51	110	2.13	0.06	0.22	0.04	1.84	5.74
ถึงปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล.							
วันที่	วันที่ของ การทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนโตรค้ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
7/8/51	38	4.00	3.56	0.03	0.07	0.90	1.87
14/8/51	45	6.71	0.33	0.03	0.29	1.70	2.00
24/8/51	55	10.79	4.36	0.05	1.75	1.80	2.00
8/9/51	70	10.60	4.69	0.10	3.80	0.88	4.78
17/9/51	79	11.73	0.20	0.35	6.19	2.71	6.72
23/9/51	86	9.26	0.26	0.83	5.45	1.28	12.62
6/10/51	100	10.67	0.02	0.94	4.01	2.28	8.32
16/10/51	110	10.57	0.06	0.32	3.71	1.84	14.18

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-2 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล.

ถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.					
วันที่	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (ทีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8/5/51	7.56	8.02	120.00	29.00	25.10
16/5/51	7.24	7.86	110.00	29.00	25.50
24/5/51	6.99	7.60	110.00	30.00	26.60
3/6/51	7.28	8.00	100.00	30.00	24.80
10/6/51	8.00	8.12	120.00	30.00	24.50
23/6/51	7.40	8.00	110.00	31.00	25.60
30/6/51	7.50	7.96	120.00	30.00	28.80
7/7/51	8.12	7.98	100.00	30.00	26.80
14/7/51	7.68	8.23	100.00	29.00	27.80
21/7/51	8.00	8.66	100.00	30.00	27.60
28/7/51	6.82	8.38	110.00	30.00	24.90
4/8/51	7.00	8.29	100.00	31.00	25.40
15/8/51	7.36	8.18	90.00	33.00	26.10
23/8/51	6.89	7.50	120.00	35.00	25.40
31/8/51	7.01	7.40	110.00	33.00	25.30
6/9/51	8.05	7.66	100.00	33.00	27.50
14/9/51	6.78	7.74	120.00	32.00	27.70
21/9/51	6.98	7.80	90.00	30.00	25.60
29/9/51	7.02	7.50	100.00	31.00	24.90
7/10/51	6.97	7.76	100.00	33.00	24.90
15/10/51	7.23	8.08	110.00	34.00	24.90
22/10/51	6.98	8.20	80.00	32.00	25.50
30/10/51	7.20	7.56	120.00	29.00	25.10
ถังปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.					
วันที่	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (ทีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8/5/51	7.66	8.01	120.00	29.00	25.10
16/5/51	7.24	7.56	110.00	30.00	25.50
24/5/51	6.99	7.40	100.00	30.00	26.60
3/6/51	7.45	8.02	100.00	30.00	24.80
10/6/51	8.02	8.12	120.00	31.00	24.50
23/6/51	7.34	8.01	130.00	33.00	25.50
30/6/51	7.60	7.95	100.00	31.00	28.70
7/7/51	8.13	8.00	100.00	30.00	26.40
14/7/51	7.82	8.20	100.00	29.00	27.60

ตั้งปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.					
วันที่	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8/5/51	7.65	8.01	120.00	29.00	25.10
16/5/51	7.30	7.56	110.00	30.00	25.50
24/5/51	6.99	7.40	110.00	31.00	26.60
3/6/51	7.45	8.02	100.00	30.00	24.80
10/6/51	8.02	8.12	120.00	31.00	24.50
23/6/51	7.35	7.91	100.00	30.00	25.50
30/6/51	7.40	7.85	80.00	30.00	28.60
7/7/51	8.11	8.02	90.00	29.00	26.70
14/7/51	7.78	8.22	80.00	30.00	28.00
21/7/51	8.11	8.66	100.00	29.00	27.60
28/7/51	6.88	8.38	110.00	31.00	25.10
4/8/51	7.07	8.27	100.00	31.00	25.20
15/8/51	7.21	8.12	90.00	32.00	25.60
23/8/51	7.45	7.50	110.00	35.00	25.40
31/8/51	7.01	7.64	90.00	32.00	25.30
6/9/51	6.82	7.68	100.00	33.00	27.70
14/9/51	6.95	7.79	90.00	30.00	25.40
21/9/51	6.95	7.78	110.00	32.00	24.90
29/9/51	7.23	8.15	90.00	34.00	24.10
7/10/51	7.10	8.02	60.00	32.00	24.90
15/10/51	6.98	7.98	80.00	31.00	24.90
22/10/51	7.05	8.01	100.00	30.00	25.50
30/10/51	7.08	7.56	70.00	31.00	24.20
ตั้งปฏิกรณ์บ่มหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล.					
วันที่	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
4/8/51	7.07	8.27	100.00	31.00	25.20
15/8/51	6.98	8.29	110.00	32.00	25.10
23/8/51	7.21	8.08	90.00	32.00	25.40
31/8/51	6.99	7.00	100.00	32.00	25.30
6/9/51	7.15	7.27	90.00	31.00	27.40
14/9/51	6.95	7.50	60.00	31.00	27.70
21/9/51	7.14	7.64	70.00	30.00	25.90
29/9/51	7.03	7.68	80.00	32.00	24.90
7/10/51	7.10	8.02	60.00	32.00	24.90
15/10/51	6.98	7.98	80.00	31.00	25.10
22/10/51	7.05	8.01	100.00	30.00	25.50
30/10/51	7.08	7.56	70.00	31.00	24.20

ตารางที่ ค-3 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการ  
บำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ในโตรเจน/ล. ที่  
เวลา 1-6 เดือน

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก. ในโตรเจน/ล.เป็นเวลา 1 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3/6/51	0	2.81	0.00	0.27	0.00	0.91	0.00
4/6/51	17	2.58	0.16	0.39	0.10	0.91	0.09
5/6/51	41	2.15	0.07	0.22	0.04	1.16	0.07
6/6/51	63	1.93	0.06	0.33	0.01	1.12	0.01
6/6/51	72	1.65	0.20	0.33	0.02	1.16	0.03
7/6/51	92	1.51	0.09	0.48	0.11	0.95	0.08
8/6/51	114	1.51	0.11	0.41	0.07	1.29	0.07
9/6/51	137	1.45	0.08	0.53	0.17	1.25	0.17
10/6/51	160	1.50	0.07	0.54	0.06	0.94	0.05
11/6/51	184	1.23	0.08	0.40	0.07	1.12	0.10
12/6/51	207	1.35	0.12	0.27	0.09	1.24	0.09
13/6/51	231	1.24	0.11	0.27	0.09	1.22	0.12
14/6/51	256	1.22	0.07	0.49	0.05	1.04	0.06
15/6/51	279	1.16	0.08	0.45	0.02	1.12	0.10
16/6/51	304	0.90	0.04	0.51	0.03	1.14	0.01
17/6/51	326	1.06	0.10	0.63	0.04	1.01	0.03
18/6/51	350	1.00	0.15	0.72	0.12	0.96	0.08
19/6/51	374	0.86	0.19	0.83	0.07	0.91	0.09
20/6/51	400	0.80	0.23	1.12	0.14	0.95	0.19
21/6/51	425	0.56	0.26	1.20	0.16	1.15	0.49
24/6/51	503.5	0.08	0.05	2.29	0.15	0.21	0.19
25/6/51	524	0.04	0.02	1.70	0.16	0.78	0.03
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก. ในโตรเจน/ล.เป็นเวลา 2 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2/7/51	0	3.06	0.00	0.03	0.00	1.06	0.01
3/7/51	22	2.55	0.07	0.04	0.00	1.11	0.03
4/7/51	44.5	2.01	0.16	0.07	0.01	1.17	0.02
5/7/51	70	2.11	0.03	0.12	0.01	1.12	0.02
6/7/51	94.5	1.45	0.17	0.16	0.02	1.17	0.03
7/7/51	114	1.41	0.22	0.18	0.02	1.20	0.03
8/7/51	141	1.60	0.07	0.26	0.03	1.21	0.06
9/7/51	161	1.34	0.20	0.29	0.03	1.25	0.05
10/7/51	182	1.03	0.22	0.32	0.09	1.57	0.14

วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11/7/51	206	0.97	0.03	0.48	0.10	1.13	0.10
12/7/51	228	0.89	0.03	0.41	0.03	1.23	0.02
13/7/51	254	0.75	0.17	0.55	0.09	1.10	0.17
14/7/51	279.5	0.64	0.12	0.78	0.32	1.54	0.25
15/7/51	300	0.41	0.21	1.01	0.18	1.13	0.07
16/7/51	323	0.28	0.22	1.37	0.35	0.87	0.22
17/7/51	348	0.23	0.19	1.38	0.26	1.26	0.23
18/7/51	372	0.14	0.12	1.48	0.21	1.49	0.29
19/7/51	396	0.08	0.07	1.81	0.17	1.54	0.10
20/7/51	420	0.03	0.03	1.97	0.20	1.25	0.10
21/7/51	444	0.02	0.02	1.84	0.77	1.51	0.27

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 3 เดือน

วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5/8/51	0	1.97	0.00	0.03	0.00	1.19	0.01
6/8/51	18	1.70	0.11	0.05	0.00	1.23	0.02
7/8/51	43	1.40	0.11	0.06	0.00	1.72	0.01
8/8/51	64	1.36	0.21	0.08	0.01	1.73	0.02
9/8/51	89.5	1.04	0.19	0.09	0.01	1.83	0.08
10/8/51	115	1.07	0.07	0.12	0.03	1.85	0.12
11/8/51	139	0.90	0.09	0.14	0.03	1.80	0.03
12/8/51	163	0.52	0.08	0.16	0.03	1.86	0.08
13/8/51	188	0.69	0.06	0.20	0.05	1.87	0.02
14/8/51	213	0.77	0.07	0.23	0.08	1.88	0.04
15/8/51	236	0.64	0.06	0.24	0.07	1.99	0.07
16/8/51	256	0.57	0.07	0.34	0.05	1.76	0.14
17/8/51	280	0.56	0.06	0.38	0.10	1.96	0.15
18/8/51	303	0.44	0.05	0.41	0.12	1.96	0.04
19/8/51	333	0.39	0.07	0.40	0.14	2.06	0.08
20/8/51	352	0.33	0.07	0.50	0.19	2.18	0.05
21/8/51	376	0.32	0.08	0.59	0.16	2.03	0.05
22/8/51	398	0.24	0.07	0.60	0.18	2.08	0.05
23/8/51	424	0.25	0.09	0.74	0.30	2.05	0.03
24/8/51	442	0.23	0.11	0.90	0.27	1.91	0.09
25/8/51	471	0.14	0.07	0.87	0.45	1.85	0.24
26/8/51	496	0.13	0.10	0.88	0.30	2.25	0.07

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 4 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2/9/51	0	2.81	0.20	0.04	0.00	1.43	0.00
3/9/51	17	2.02	0.32	0.06	0.01	1.46	0.10
4/9/51	42	1.95	0.18	0.10	0.04	1.65	0.01
5/9/51	66	1.14	0.11	0.14	0.07	1.59	0.03
6/9/51	93	1.74	0.13	0.17	0.09	1.89	0.09
7/9/51	111	1.29	0.00	0.22	0.12	1.77	0.10
8/9/51	143	1.11	0.21	0.40	0.23	1.67	0.08
9/9/51	167	0.49	0.18	0.54	0.30	1.69	0.11
10/9/51	186	0.48	0.25	0.70	0.39	1.83	0.07
11/9/51	210	0.27	0.25	0.80	0.38	1.98	0.27
12/9/51	233	0.12	0.19	0.92	0.36	1.82	0.16
13/9/51	251	0.07	0.13	1.03	0.27	1.80	0.12
14/9/51	271	0.03	0.06	0.99	0.19	2.25	0.18
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 5 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9/10/51	0	2.66	0.11	0.25	0.01	0.78	0.16
10/10/51	21	1.35	0.09	0.26	0.01	1.67	0.18
11/10/51	45	0.68	0.08	0.35	0.03	1.86	0.23
12/10/51	68	0.69	0.02	0.39	0.08	1.71	0.17
13/10/51	94	0.46	0.17	0.62	0.14	1.56	0.15
14/10/51	117	0.27	0.21	0.67	0.12	1.66	0.41
16/10/51	165	0.05	0.01	0.61	0.09	2.37	0.05
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 6 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
4/11/51	0	3.16	0.23	0.02	0.00	1.91	0.05
5/11/51	17.5	2.89	0.24	0.04	0.01	1.82	0.04
6/11/51	40	2.43	1.41	0.14	0.07	1.67	0.16
7/11/51	65.5	1.54	0.24	0.24	0.09	2.29	0.12
8/11/51	89.5	0.73	0.07	0.43	0.17	2.41	0.28
9/11/51	108.5	0.16	0.07	0.62	0.16	2.16	0.04
10/11/51	114.5	0.04	0.01	0.59	0.06	2.32	0.15

ตารางที่ ค-4 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการ  
บำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่  
เวลา 1-3 เดือน

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 1 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3/6/51	0	2.81	0.00	0.27	0.00	0.91	0.00
4/6/51	17	2.34	0.26	0.55	0.12	0.78	0.11
5/6/51	41	2.02	0.19	0.28	0.07	1.11	0.04
6/6/51	63	1.69	0.27	0.37	0.02	1.09	0.03
6/6/51	72	1.72	0.41	0.48	0.06	0.88	0.26
7/6/51	92	1.45	0.21	0.51	0.06	1.00	0.06
8/6/51	114	1.42	0.17	0.50	0.06	1.33	0.03
9/6/51	137	1.36	0.14	0.68	0.15	1.23	0.11
10/6/51	160	1.34	0.13	0.74	0.03	0.97	0.10
11/6/51	184	1.13	0.14	0.48	0.08	1.24	0.08
12/6/51	207	1.24	0.10	0.43	0.10	1.30	0.08
13/6/51	231	1.15	0.04	0.38	0.10	1.34	0.07
14/6/51	256	1.12	0.06	0.81	0.06	1.07	0.22
15/6/51	279	1.01	0.07	0.80	0.04	1.16	0.23
16/6/51	304	0.70	0.09	0.94	0.06	1.15	0.25
17/6/51	326	0.89	0.24	1.05	0.09	1.10	0.23
18/6/51	350	0.84	0.36	1.28	0.10	0.93	0.21
19/6/51	374	0.81	0.52	1.53	0.39	0.79	0.44
20/6/51	400	0.70	0.60	1.73	0.28	0.83	0.31
21/6/51	425	0.73	0.67	1.76	0.32	1.12	0.21
24/6/51	503.5	0.31	0.42	2.20	0.33	0.82	0.48
25/6/51	524	0.29	0.41	2.69	0.34	0.45	0.38
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 2 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2/7/51	0	3.06	0.00	0.03	0.00	1.06	0.01
3/7/51	22	2.74	0.07	0.04	0.01	1.11	0.01
4/7/51	44.5	2.23	0.11	0.07	0.02	1.18	0.01
5/7/51	70	2.10	0.10	0.13	0.03	1.13	0.02
6/7/51	94.5	1.47	0.06	0.20	0.07	1.10	0.09
7/7/51	114	1.48	0.14	0.23	0.05	1.16	0.00
8/7/51	141	1.72	0.20	0.33	0.03	1.15	0.06
9/7/51	161	1.50	0.26	0.45	0.10	1.14	0.05
10/7/51	182	0.91	0.12	0.57	0.12	1.48	0.23

วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11/7/51	206	0.78	0.11	0.75	0.10	1.04	0.03
12/7/51	228	0.73	0.07	0.83	0.11	1.04	0.03
13/7/51	254	0.32	0.05	1.50	0.15	0.57	0.25
14/7/51	279.5	0.24	0.04	1.20	0.13	1.11	0.06
15/7/51	300	0.08	0.04	1.35	0.24	1.10	0.17
16/7/51	323	0.01	0.01	1.84	0.25	0.70	0.37
17/7/51	348	0.01	0.01	1.88	0.40	1.02	0.16
18/7/51	372	0.00	0.01	1.98	0.31	1.06	0.16
19/7/51	396	0.00	0.00	2.21	0.38	1.11	0.33
20/7/51	420	0.00	0.00	2.37	0.31	1.08	0.22
21/7/51	444	0.00	0.00	2.51	0.59	0.94	0.35

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 3 เดือน

วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5/8/51	0	1.97	0.00	0.03	0.00	1.19	0.01
6/8/51	18	1.59	0.13	0.06	0.01	1.22	0.02
7/8/51	43	1.26	0.13	0.06	0.00	1.72	0.02
8/8/51	64	1.39	0.14	0.07	0.01	1.76	0.02
9/8/51	89.5	1.13	0.22	0.08	0.01	1.72	0.04
10/8/51	115	1.08	0.12	0.09	0.01	1.89	0.04
11/8/51	139	0.91	0.08	0.12	0.02	1.83	0.04
12/8/51	163	0.51	0.08	0.14	0.03	1.89	0.07
13/8/51	188	0.75	0.09	0.17	0.03	1.89	0.03
14/8/51	213	0.74	0.09	0.21	0.05	1.91	0.04
15/8/51	236	0.64	0.08	0.22	0.05	1.96	0.06
16/8/51	256	0.61	0.04	0.37	0.08	1.83	0.07
17/8/51	280	0.51	0.04	0.43	0.05	1.96	0.15
18/8/51	303	0.38	0.04	0.53	0.07	1.92	0.08
19/8/51	333	0.29	0.05	0.58	0.07	2.01	0.07
20/8/51	352	0.16	0.06	0.83	0.15	2.10	0.14
21/8/51	376	0.07	0.06	0.94	0.13	1.96	0.13
22/8/51	398	0.04	0.04	0.94	0.10	2.14	0.10
23/8/51	424	0.01	0.01	1.25	0.10	1.93	0.08
24/8/51	442	0.00	0.00	1.30	0.09	1.87	0.17

ตารางที่ ค-5 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ในโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-6 เดือน

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก. ในโตรเจน/ล.เป็นเวลา 1 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
3/6/51	0	2.81	0.00	0.26	0.00	0.62	0.01
4/6/51	17	2.31	0.03	0.44	0.04	1.00	0.03
5/6/51	41	1.93	0.13	0.54	0.02	1.06	0.10
6/6/51	63	1.40	0.20	0.88	0.10	0.97	0.01
6/6/51	72	1.10	0.22	1.12	0.09	0.78	0.10
7/6/51	92	0.77	0.11	1.53	0.19	0.50	0.10
8/6/51	114	0.62	0.08	1.80	0.10	0.72	0.08
9/6/51	137	0.43	0.08	2.32	0.35	0.47	0.29
10/6/51	160	0.38	0.07	2.78	0.54	0.01	0.69
11/6/51	184	0.24	0.07	2.52	0.38	0.27	0.24
12/6/51	207	0.22	0.10	2.29	0.57	0.63	0.35
13/6/51	231	0.21	0.09	1.94	0.51	1.04	0.22
14/6/51	256	0.18	0.10	2.89	0.50	0.28	0.13
15/6/51	279	0.17	0.07	3.25	0.41	0.09	0.13
16/6/51	304	0.13	0.05	3.62	0.55	0.01	0.16
17/6/51	326	0.20	0.10	3.51	0.81	0.18	0.26
18/6/51	350	0.21	0.10	4.31	0.94	0.01	0.45
19/6/51	374	0.26	0.15	4.10	0.87	0.02	0.25
20/6/51	400	0.22	0.13	4.94	0.87	0.01	0.21
21/6/51	425	0.25	0.16	5.09	0.73	0.27	1.38
24/6/51	503.5	0.09	0.03	3.13	0.41	0.52	1.55
25/6/51	524	0.03	0.01	5.33	1.59	0.27	0.34
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก. ในโตรเจน/ล.เป็นเวลา 2 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนโตรต์ (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ในโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2/7/51	0	3.06	0.00	0.03	0.00	1.06	0.01
3/7/51	22	2.36	0.19	0.09	0.01	1.11	0.02
4/7/51	44.5	2.12	0.76	0.22	0.03	1.14	0.01
5/7/51	70	1.59	0.09	0.48	0.02	0.95	0.05
6/7/51	94.5	1.14	0.18	0.73	0.15	0.92	0.09
7/7/51	114	0.84	0.23	0.88	0.21	0.93	0.08
8/7/51	141	1.14	0.42	1.13	0.34	1.05	0.12
9/7/51	161	0.68	0.40	1.47	0.38	0.81	0.17
10/7/51	182	0.26	0.24	1.51	0.37	1.19	0.35



วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11/7/51	206	0.18	0.15	1.80	0.35	0.67	0.14
12/7/51	228	0.19	0.09	1.52	0.12	1.00	0.32
13/7/51	254	0.11	0.07	1.45	0.47	0.89	0.16
14/7/51	279.5	0.06	0.05	2.38	0.43	0.99	0.21
15/7/51	300	0.02	0.02	2.44	0.48	0.99	0.07
16/7/51	323	0.02	0.02	2.80	0.31	0.69	0.17
17/7/51	348	0.02	0.01	2.50	0.62	1.32	0.21
18/7/51	372	0.01	0.01	2.53	0.32	1.41	0.27
19/7/51	396	0.00	0.00	3.28	0.99	0.72	0.50
20/7/51	420	0.00	0.00	3.42	0.90	1.10	0.74
21/7/51	444	0.00	0.00	3.50	1.01	0.65	0.18
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 3 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5/8/51	0	1.97	0.00	0.03	0.00	1.19	0.01
6/8/51	18	1.71	0.20	0.05	0.00	1.22	0.02
7/8/51	43	1.38	0.15	0.08	0.01	1.73	0.03
8/8/51	64	1.17	0.19	0.12	0.01	1.76	0.04
9/8/51	89.5	1.07	0.22	0.15	0.02	1.81	0.05
10/8/51	115	1.03	0.10	0.20	0.04	2.08	0.13
11/8/51	139	0.71	0.16	0.25	0.05	1.84	0.04
12/8/51	163	0.48	0.03	0.31	0.07	1.92	0.04
13/8/51	188	0.59	0.04	0.42	0.09	1.91	0.08
14/8/51	213	0.58	0.01	0.48	0.15	1.91	0.09
15/8/51	236	0.46	0.09	0.56	0.20	2.00	0.11
16/8/51	256	0.39	0.15	0.72	0.24	1.94	0.02
17/8/51	280	0.34	0.19	0.82	0.24	2.05	0.09
18/8/51	303	0.22	0.18	0.96	0.38	1.97	0.18
19/8/51	333	0.19	0.15	0.96	0.30	2.15	0.12
20/8/51	352	0.13	0.12	1.13	0.28	2.28	0.20
21/8/51	376	0.08	0.07	1.23	0.22	2.11	0.22
22/8/51	398	0.07	0.06	1.17	0.14	2.38	0.20
23/8/51	424	0.09	0.08	1.40	0.06	2.29	0.18
24/8/51	442	0.06	0.05	1.63	0.04	2.06	0.22
25/8/51	471	0.04	0.04	1.33	0.13	2.30	0.08
26/8/51	496	0.03	0.02	1.42	0.27	2.53	0.11

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 4 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2/9/51	0	2.91	0.04	0.04	0.00	1.43	0.00
3/9/51	17	1.86	0.07	0.07	0.00	1.55	0.02
4/9/51	42	1.99	0.11	0.16	0.02	1.67	0.03
5/9/51	66	1.02	0.08	0.25	0.02	1.63	0.08
6/9/51	93	1.53	0.05	0.36	0.06	1.88	0.07
7/9/51	111	0.89	0.14	0.49	0.07	1.66	0.16
8/9/51	143	0.40	0.10	0.81	0.19	1.73	0.24
9/9/51	167	0.07	0.06	0.99	0.20	1.90	0.04
10/9/51	186	0.05	0.04	1.12	0.15	1.94	0.07
11/9/51	210	0.02	0.01	1.11	0.12	2.41	0.06
12/9/51	233	0.01	0.00	1.18	0.10	2.09	0.09
13/9/51	251	0.01	0.02	1.11	0.07	2.06	0.20
14/9/51	271	0.01	0.00	1.02	0.04	2.87	0.58
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 5 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9/10/51	0	2.66	0.11	0.25	0.01	0.78	0.16
10/10/51	21	1.39	0.08	0.26	0.00	1.68	0.11
11/10/51	45	0.66	0.09	0.39	0.02	1.82	0.11
12/10/51	68	0.43	0.06	0.39	0.01	1.93	0.44
13/10/51	94	0.09	0.07	0.45	0.11	2.06	0.18
14/10/51	117	0.02	0.01	0.29	0.12	2.54	0.25
16/10/51	165	0.03	0.01	0.02	0.01	2.76	0.40
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 6 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
4/11/51	0	3.16	0.23	0.02	0.00	1.91	0.05
5/11/51	17.5	2.71	0.32	0.04	0.01	1.96	0.05
6/11/51	40	1.37	0.10	0.17	0.11	1.96	0.11
7/11/51	65.5	1.41	0.58	0.27	0.11	2.92	0.59
8/11/51	89.5	0.53	0.34	0.22	0.09	3.24	0.73
9/11/51	108.5	0.17	0.04	0.29	0.20	2.61	0.16
10/11/51	114.5	0.05	0.02	0.20	0.24	2.89	0.36

ตารางที่ ค-6 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่เวลา 1-3 เดือน

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 1 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2/9/51	0	2.81	0.20	0.04	0.00	1.43	0.00
3/9/51	17	1.63	0.05	0.06	0.01	1.57	0.05
4/9/51	42	1.97	0.15	0.09	0.01	1.65	0.01
5/9/51	66	1.48	0.17	0.16	0.07	1.86	0.17
6/9/51	93	1.77	0.13	0.18	0.06	1.93	0.10
7/9/51	111	1.39	0.11	0.24	0.07	1.72	0.12
8/9/51	143	0.95	0.15	0.45	0.12	1.65	0.02
9/9/51	167	0.38	0.09	0.66	0.23	1.86	0.09
10/9/51	186	0.31	0.23	0.94	0.32	1.88	0.09
11/9/51	210	0.13	0.14	1.09	0.23	2.25	0.24
12/9/51	233	0.03	0.05	1.26	0.15	1.83	0.13
13/9/51	251	0.00	0.00	1.28	0.13	2.24	0.16
14/9/51	271	0.03	0.00	1.20	0.15	2.29	0.06
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 2 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
9/10/51	0	2.66	0.11	0.25	0.01	0.78	0.16
10/10/51	21	1.35	0.09	0.26	0.01	1.79	0.07
11/10/51	45	0.61	0.15	0.73	0.14	2.59	0.33
12/10/51	68	0.28	0.24	0.88	0.21	1.96	0.08
13/10/51	94	0.07	0.12	1.13	0.10	1.71	0.12
14/10/51	117	0.01	0.01	0.97	0.23	2.02	0.16
16/10/51	165	0.02	0.00	1.07	0.29	2.12	0.20
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในแอมโมเนียความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล.เป็นเวลา 3 เดือน							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
4/11/51	0	3.16	0.23	0.02	0.00	1.91	0.05
5/11/51	17.5	2.43	0.33	0.08	0.01	2.07	0.03
6/11/51	40	1.27	0.14	0.20	0.05	1.88	0.19
7/11/51	65.5	1.16	0.06	0.37	0.06	2.75	0.34
8/11/51	89.5	0.43	0.15	0.48	0.06	2.73	0.14
9/11/51	108.5	0.15	0.04	0.62	0.08	2.57	0.23
10/11/51	114.5	0.03	0.01	0.54	0.15	2.75	0.29
21/7/51	444	0.00	0.00	3.50	1.01	0.65	0.18

ตารางที่ ค-7 คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่ม  
ในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล.

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0 มก.ไนโตรเจน/ล.					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
เดือนที่ 1 (1)	6.80	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 1 (2)	6.47	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 1 (3)	6.80	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 2 (1)	6.90	8.52	150.00	36.00	27.90
เดือนที่ 2 (2)	6.74	8.46	170.00	40.00	27.50
เดือนที่ 2 (3)	6.82	8.49	190.00	46.00	27.70
เดือนที่ 3 (1)	7.02	7.79	140.00	30.00	28.30
เดือนที่ 3 (2)	6.63	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 3 (3)	6.09	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 4 (1)	6.63	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 4 (2)	5.48	8.21	170.00	31.00	27.90
เดือนที่ 4 (3)	5.51	8.24	160.00	30.00	28.00
เดือนที่ 5 (1)	5.46	8.25	180.00	30.00	28.10
เดือนที่ 5 (2)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 5 (3)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 6 (1)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 6 (2)	6.47	8.49	170.00	35.00	28.70
เดือนที่ 6 (3)	6.47	8.52	160.00	33.00	28.70
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล.					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
เดือนที่ 1 (1)	6.63	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 1 (2)	6.09	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 1 (3)	6.63	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 2 (1)	6.92	8.44	140.00	40.00	27.60
เดือนที่ 2 (2)	6.86	8.45	150.00	40.00	27.70
เดือนที่ 2 (3)	6.94	8.43	170.00	45.00	27.80
เดือนที่ 3 (1)	7.02	7.79	140.00	30.00	28.30
เดือนที่ 3 (2)	6.92	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 3 (3)	6.86	8.44	140.00	40.00	27.60

ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล.					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
เดือนที่ 1 (1)	7.02	7.79	140.00	30.00	28.30
เดือนที่ 1 (2)	6.65	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 1 (3)	6.60	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 2 (1)	6.32	7.68	170.00	29.00	26.80
เดือนที่ 2 (2)	6.77	8.46	170.00	42.00	28.00
เดือนที่ 2 (3)	6.83	8.51	160.00	35.00	27.70
เดือนที่ 3 (1)	6.71	8.42	200.00	55.00	27.60
เดือนที่ 3 (2)	6.47	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 3 (3)	6.65	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 4 (1)	6.60	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 4 (2)	5.45	8.23	150.00	30.50	28.30
เดือนที่ 4 (3)	5.39	8.23	140.00	30.50	28.40
เดือนที่ 5 (1)	5.37	8.23	160.00	31.00	28.60
เดือนที่ 5 (2)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 5 (3)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 6 (1)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 6 (2)	6.47	8.56	170.00	35.00	29.10
เดือนที่ 6 (3)	6.47	8.57	170.00	34.00	29.30
ตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 มก.ไนโตรเจน/ล.					
ชุดการทดลอง	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเป็นด่าง (มก./ล.)	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
เดือนที่ 1 (1)	6.47	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 1 (2)	6.58	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 1 (3)	6.52	7.73	200.00	30.00	28.50
เดือนที่ 2 (1)	5.39	8.24	170.00	35.00	28.00
เดือนที่ 2 (2)	5.48	8.24	160.00	33.00	27.90
เดือนที่ 2 (3)	5.46	8.23	160.00	34.00	27.90
เดือนที่ 3 (1)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 3 (2)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70
เดือนที่ 3 (3)	6.80	7.86	170.00	30.00	27.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

จากการทดลองที่ 4.3 ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน และคุณภาพน้ำภายในจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมซึ่งติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองซึ่งติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง

ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ								
วันที่	วันที่ของ การทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
16/8/51	0	1.02	0.06	0.02	0.00	0.00	0.96	0.00
18/8/51	2	2.08	0.51	0.03	0.01	0.00	1.56	0.00
20/8/51	4	3.38	1.75	0.07	0.04	0.00	1.60	0.00
22/8/51	6	4.28	2.54	0.08	0.07	0.00	1.68	0.00
24/8/51	8	5.16	3.43	0.36	0.14	0.00	1.58	0.04
26/8/51	10	5.91	3.95	0.14	0.28	0.01	1.68	0.03
28/8/51	12	7.23	4.32	0.01	0.80	0.01	2.11	0.01
30/8/51	14	7.37	3.96	0.69	2.04	0.02	1.37	0.05
1/9/51	16	10.10	0.09	0.00	8.30	0.16	1.71	0.17
3/9/51	18	11.36	0.13	0.02	9.14	0.08	2.09	0.05
5/9/51	20	13.85	0.00	0.01	9.36	0.02	4.49	0.30
7/9/51	22	11.64	0.04	0.07	8.13	0.06	3.47	0.12
9/9/51	24	11.69	0.01	0.01	7.97	0.16	3.70	0.14
11/9/51	26	15.17	0.02	0.01	11.37	0.12	3.79	0.68
13/9/51	28	15.09	0.01	0.00	8.51	0.05	6.57	0.26
15/9/51	30	18.12	0.01	0.02	11.55	0.08	6.55	2.24
17/9/51	32	18.36	0.09	0.00	12.88	0.14	5.39	2.25
19/9/51	34	18.12	0.06	0.01	13.85	0.13	4.21	0.19
21/9/51	36	19.39	0.05	0.03	16.10	0.45	3.25	0.34
23/9/51	38	29.31	0.01	0.01	16.19	0.53	13.12	2.00
25/9/51	40	23.13	0.16	0.01	15.05	0.36	7.91	0.18
27/9/51	42	23.03	0.16	0.00	16.69	0.66	6.18	0.57
29/9/51	44	20.13	0.18	0.02	13.99	0.45	5.96	0.22
1/10/51	46	26.18	0.23	0.04	8.61	0.16	17.34	0.78
3/10/51	48	26.24	0.11	0.00	2.84	0.29	23.29	0.49
5/10/51	50	31.55	0.24	0.01	0.10	0.00	31.21	0.49
7/10/51	52	33.52	0.04	0.01	0.13	0.01	33.36	0.58
9/10/51	54	35.33	0.05	0.02	0.09	0.00	35.19	0.29
11/10/51	56	29.22	0.07	0.01	0.06	0.00	29.08	0.12
13/10/51	58	24.09	0.11	0.02	0.18	0.01	23.80	0.03
15/10/51	60	39.12	0.17	0.01	0.23	0.01	38.73	0.40
17/10/51	62	44.28	0.30	0.01	0.50	0.03	43.48	0.22
20/10/51	65	53.31	0.35	0.00	0.94	0.11	52.01	0.87
22/10/51	67	52.00	0.35	0.05	0.87	0.09	50.77	2.11
24/10/51	69	50.50	0.25	0.06	1.16	0.03	49.09	0.61
27/10/51	72	59.14	0.24	0.07	0.96	0.05	57.94	1.00
29/10/51	74	61.61	0.21	0.02	0.94	0.04	60.46	1.45
31/10/51	76	55.62	0.31	0.04	1.01	0.03	54.30	5.83
3/11/51	79	47.70	0.25	0.11	1.59	0.09	45.86	2.74
5/11/51	81	56.15	0.23	0.03	0.58	0.04	55.34	2.09
7/11/51	83	58.40	0.21	0.04	0.61	0.03	57.57	1.45
10/11/51	86	70.06	0.09	0.03	0.34	0.01	69.64	2.54
12/11/51	88	71.98	0.00	0.00	0.45	0.01	71.53	6.50
14/11/51	90	65.56	0.06	0.04	0.22	0.02	65.29	3.87

ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งหัดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่								
วันที่	วันที่ของ การทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนโตรด (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
16/8/51	0	0.88	0.03	0.01	0.00	0.00	0.85	0.10
18/8/51	2	1.84	0.29	0.01	0.01	0.00	1.53	0.01
20/8/51	4	2.88	1.25	0.01	0.03	0.00	1.60	0.00
22/8/51	6	4.49	2.36	0.06	0.08	0.00	2.04	0.00
24/8/51	8	5.73	3.82	0.04	0.35	0.00	1.56	0.01
26/8/51	10	5.73	3.34	0.44	1.05	0.01	1.34	0.08
28/8/51	12	8.45	0.81	0.20	5.74	0.05	1.90	0.04
30/8/51	14	6.99	0.01	0.00	6.88	0.09	0.26	0.13
1/9/51	16	9.48	0.03	0.01	9.42	0.02	0.25	0.21
3/9/51	18	10.85	0.02	0.00	9.25	0.01	1.58	0.38
5/9/51	20	12.10	0.09	0.01	9.10	0.31	2.92	1.20
7/9/51	22	12.68	0.10	0.01	8.74	0.18	3.84	0.22
9/9/51	24	8.97	0.07	0.02	5.58	0.02	3.32	0.13
11/9/51	26	12.31	0.07	0.01	9.33	0.18	2.91	0.13
13/9/51	28	13.48	0.00	0.00	9.85	0.13	3.62	0.37
15/9/51	30	13.81	0.03	0.01	9.01	0.13	4.77	0.52
17/9/51	32	14.88	0.00	0.00	9.69	0.07	5.19	0.14
19/9/51	34	13.40	0.02	0.01	9.87	0.35	3.51	0.48
21/9/51	36	13.88	0.03	0.00	9.65	0.22	4.20	0.71
23/9/51	38	15.85	0.02	0.01	9.18	0.68	6.65	0.65
25/9/51	40	14.71	0.19	0.07	7.28	0.15	7.23	0.26
27/9/51	42	14.23	0.20	0.04	5.21	0.02	8.82	1.53
29/9/51	44	12.46	0.13	0.01	6.72	0.82	5.61	0.85
1/10/51	46	13.75	0.31	0.04	3.66	0.51	9.78	0.55
3/10/51	48	12.34	0.25	0.04	1.91	0.04	10.18	0.14
5/10/51	50	14.99	0.21	0.08	0.93	0.03	13.86	0.17
7/10/51	52	14.61	0.09	0.01	0.54	0.19	13.98	0.52
9/10/51	54	20.28	0.09	0.05	0.40	0.19	19.79	0.21
11/10/51	56	16.21	0.06	0.01	0.25	0.02	15.91	0.01
13/10/51	58	18.57	0.09	0.01	0.24	0.01	18.24	0.07
15/10/51	60	20.83	0.08	0.02	0.30	0.01	20.45	1.66
17/10/51	62	22.81	0.08	0.02	0.35	0.01	22.38	0.43
20/10/51	65	17.76	0.16	0.03	0.37	0.04	17.23	0.73
22/10/51	67	24.77	0.16	0.03	0.40	0.04	24.22	0.88
24/10/51	69	27.63	0.09	0.03	0.33	0.01	27.21	3.00
27/10/51	72	19.30	0.04	0.03	0.14	0.01	19.12	0.24
29/10/51	74	32.87	0.01	0.01	0.30	0.01	32.56	0.39
31/10/51	76	27.82	0.13	0.11	0.33	0.02	27.36	2.67
3/11/51	79	31.66	0.09	0.03	0.13	0.00	31.44	1.18
5/11/51	81	33.33	0.23	0.19	0.16	0.00	32.94	1.43
7/11/51	83	29.91	0.08	0.02	0.22	0.01	29.61	0.35
10/11/51	86	35.38	0.08	0.00	0.17	0.02	35.13	3.81
12/11/51	88	33.28	0.00	0.00	0.29	0.06	32.99	0.12
14/11/51	90	35.02	0.08	0.05	0.24	0.00	34.70	0.70

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว								
วันที่	วันที่ของ การทดลอง	ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	แอมโมเนีย (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนโตรด (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรด (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
16/8/51	0	0.99	0.01	0.01	0.01	0.00	0.97	0.00
18/8/51	2	1.93	0.28	0.01	0.02	0.00	1.63	0.00
20/8/51	4	2.81	1.11	0.03	0.08	0.00	1.62	0.00
22/8/51	6	4.35	2.07	0.05	0.36	0.01	1.92	0.01
24/8/51	8	5.32	2.11	0.04	1.76	0.12	1.45	0.15
26/8/51	10	4.14	0.58	0.02	2.31	0.00	1.25	0.06
28/8/51	12	8.08	0.00	0.00	5.34	0.05	2.75	0.11
30/8/51	14	5.67	0.04	0.01	3.35	0.03	2.27	0.06
1/9/51	16	8.66	0.03	0.01	4.89	0.25	3.75	0.22
3/9/51	18	10.43	0.05	0.02	4.31	0.36	6.06	0.30
5/9/51	20	10.90	0.06	0.01	2.81	0.05	8.03	0.32
7/9/51	22	11.20	0.07	0.01	1.46	0.28	9.67	1.87
9/9/51	24	14.24	0.05	0.00	0.31	0.00	13.88	0.25
11/9/51	26	12.54	0.17	0.01	0.44	0.08	11.93	0.46
13/9/51	28	11.77	0.04	0.01	0.29	0.00	11.44	0.49
15/9/51	30	14.48	0.04	0.01	0.18	0.01	14.26	2.68
17/9/51	32	14.33	0.06	0.01	0.28	0.01	13.99	1.98
19/9/51	34	11.38	0.06	0.02	0.19	0.02	11.14	0.38
21/9/51	36	13.12	0.06	0.01	0.29	0.02	12.77	0.13
23/9/51	38	16.97	0.06	0.01	0.28	0.01	16.64	0.78
25/9/51	40	16.27	0.24	0.10	0.28	0.00	15.76	0.25
27/9/51	42	14.98	0.21	0.03	0.35	0.01	14.42	0.09
29/9/51	44	13.02	0.10	0.02	0.16	0.00	12.76	0.20
1/10/51	46	19.42	0.24	0.06	0.61	0.03	18.58	1.21
3/10/51	48	19.70	0.22	0.07	0.19	0.00	19.29	2.21
5/10/51	50	23.28	0.10	0.02	0.11	0.01	23.06	0.21
7/10/51	52	21.05	0.06	0.02	0.09	0.00	20.91	0.52
9/10/51	54	24.44	0.04	0.01	0.12	0.01	24.28	0.31
11/10/51	56	22.87	0.07	0.03	0.23	0.01	22.56	0.89
13/10/51	58	27.35	0.12	0.01	0.22	0.02	27.01	0.15
15/10/51	60	22.12	0.12	0.01	0.16	0.01	21.83	0.02
17/10/51	62	29.05	0.15	0.01	0.41	0.00	28.48	0.28
20/10/51	65	22.40	0.31	0.01	0.31	0.01	21.78	0.98
22/10/51	67	28.73	0.43	0.08	0.37	0.01	27.93	0.65
24/10/51	69	35.68	0.24	0.02	0.41	0.01	35.04	0.64
27/10/51	72	41.30	0.21	0.02	0.38	0.01	40.71	0.88
29/10/51	74	32.90	0.24	0.07	0.33	0.00	32.33	0.15
31/10/51	76	34.89	0.23	0.04	0.29	0.00	34.36	0.76
3/11/51	79	33.30	0.10	0.02	0.18	0.00	33.01	5.00
5/11/51	81	35.95	0.21	0.01	0.23	0.01	35.52	3.78
7/11/51	83	42.97	0.15	0.03	0.23	0.01	42.59	0.57
10/11/51	86	41.85	0.13	0.03	0.15	0.00	41.57	0.41
12/11/51	88	41.84	0.05	0.04	0.25	0.12	41.54	3.33
14/11/51	90	36.02	0.15	0.05	0.19	0.01	35.68	2.06

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ง-2 คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งทุกชุดการทดลอง

คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ						
วันที่ของ การทดลอง	ปริมาณ คลอโรฟิลล์-เอ (มก./ลบ.ม.)	สภาพ ความเป็นต่าง (มก./ล.)	ออกซิเจน ละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็น กรด-ต่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	0.57	160	8.50	8.02	30.0	31.40
2	0.00	140	8.82	8.42	30.0	28.50
4	11.17	160	7.19	8.43	28.0	28.80
6	40.15	190	7.33	8.44	30.0	29.60
8	69.93	200	7.21	8.25	30.0	28.00
10	80.44	220	7.43	8.22	29.5	29.00
12	63.97	220	-	8.12	29.5	31.20
14	62.31	230	-	7.99	32.0	26.10
16	180.00	210	-	8.05	30.0	26.10
18	160.69	160	-	8.01	30.0	30.30
20	32.58	160	-	7.93	32.0	26.70
22	23.62	150	-	7.72	30.5	27.80
24	52.18	170	-	8.03	32.0	25.20
26	81.22	150	-	7.79	31.0	25.80
28	48.20	160	-	7.94	30.5	28.00
30	40.12	160	5.50	8.12	32.0	27.00
32	42.71	140	5.00	7.91	30.5	27.10
34	142.96	140	6.20	8.05	31.0	28.10
36	65.47	130	6.51	7.91	31.0	27.60
38	100.26	170	7.68	7.90	31.0	31.80
40	109.47	120	7.20	7.93	32.0	30.00
42	100.97	140	6.57	7.93	35.0	28.50
44	48.91	130	7.23	7.65	30.0	29.70
46	137.42	120	6.80	7.87	32.0	30.00
48	169.64	130	6.34	7.81	29.0	28.30
50	181.31	130	6.71	7.84	30.0	30.10
52	232.76	110	7.02	7.87	35.0	28.90
54	172.14	110	6.20	8.05	35.0	28.40
56	173.39	110	6.54	8.09	33.0	30.50
58	175.79	70	6.47	8.17	29.0	30.00
60	155.05	160	6.21	8.30	31.0	27.50
62	184.58	140	6.89	8.02	35.0	26.80
65	164.01	140	6.50	7.95	35.5	29.20
67	143.09	130	6.34	7.89	36.0	27.40
69	90.26	130	7.02	8.06	35.0	26.00
72	142.22	120	6.50	7.86	34.0	28.10
74	154.05	130	6.12	7.85	34.0	26.50
76	120.23	120	6.66	7.77	35.0	26.80
79	271.98	110	6.46	7.93	33.0	25.00
81	161.35	120	6.74	7.64	30.0	26.60
83	187.85	110	6.45	7.50	30.0	28.90
86	190.45	100	6.64	7.56	31.0	23.70
88	179.11	100	6.65	7.55	32.0	27.00
90	210.81	100	6.62	7.75	30.0	26.50

คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่						
วันที่ของการทดลอง	ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ (มก./ลบ.ม.)	สภาพความเป็นต่าง (มก./ล.)	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็นกรด-ด่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	1.00	160	8.75	7.99	30.0	31.10
2	0.00	140	8.76	8.38	30.0	28.50
4	3.46	160	7.26	8.42	30.0	28.80
6	28.30	170	7.25	8.40	30.0	29.60
8	18.76	200	7.12	8.50	30.0	28.00
10	21.85	190	7.32	8.13	30.0	29.40
12	9.78	200	-	8.16	30.0	31.80
14	15.01	190	-	7.87	32.0	26.10
16	4.06	180	-	8.03	32.0	26.10
18	11.88	160	-	7.99	30.0	30.50
20	13.44	190	-	7.90	30.0	28.10
22	5.24	130	-	7.77	33.0	27.70
24	5.68	160	-	8.00	31.0	25.20
26	4.87	170	-	7.89	30.5	25.80
28	9.80	170	-	7.86	31.0	28.00
30	11.84	140	5.30	7.91	32.0	27.00
32	14.19	150	4.88	7.91	30.5	27.10
34	43.21	140	6.31	8.06	31.0	28.20
36	122.46	120	6.51	8.02	31.0	27.70
38	78.89	160	7.42	8.00	31.0	31.70
40	36.58	140	7.01	8.00	30.0	30.00
42	39.70	170	6.38	7.98	33.0	28.40
44	83.11	150	7.48	7.80	29.0	29.80
46	47.67	160	6.75	7.88	30.0	30.00
48	41.55	120	7.32	7.83	31.0	28.40
50	28.70	140	7.13	7.93	30.0	30.20
52	28.77	140	6.56	8.00	31.0	28.90
54	33.14	140	6.34	8.09	33.0	28.30
56	44.49	130	6.25	8.15	31.0	31.00
58	37.16	100	6.47	8.34	25.0	30.90
60	39.32	180	6.43	8.33	34.0	27.90
62	59.17	180	7.01	8.16	33.0	27.00
65	119.36	170	6.48	8.11	32.0	29.10
67	68.44	170	6.78	7.98	31.0	27.90
69	86.84	180	7.30	8.12	34.0	26.20
72	83.30	160	6.80	8.03	34.0	28.10
74	112.30	170	6.22	7.95	35.0	26.90
76	119.04	160	6.73	7.98	35.0	27.10
79	170.90	160	6.56	7.99	30.0	25.00
81	174.75	150	6.65	7.89	30.0	26.70
83	186.43	160	6.66	7.64	30.0	28.90
86	209.22	150	6.43	7.57	30.0	24.10
88	285.17	130	6.24	7.84	30.0	27.20
90	270.79	160	6.70	8.07	29.0	26.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณภาพน้ำภายในถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว						
วันที่ของ การทดลอง	ปริมาณ คลอโรฟิลล์-เอ (มก./ลบ.ม.)	สภาพ ความเป็นต่าง (มก./ล.)	ออกซิเจน ละลายน้ำ (มก./ล.)	ความเป็น กรด-ต่าง	ความเค็ม (พีเอสยู)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	1.00	160	8.55	8.03	30.0	31.00
2	2.83	140	8.76	8.37	30.0	28.50
4	5.59	140	7.28	8.40	30.0	28.80
6	5.00	180	7.21	8.44	30.0	29.60
8	6.96	190	7.15	8.25	30.0	28.00
10	14.98	170	7.45	8.10	30.0	29.40
12	48.86	190	-	8.19	30.0	31.30
14	16.39	170	-	7.84	31.0	26.10
16	40.11	170	-	7.96	31.0	26.10
18	80.86	170	-	7.83	31.0	30.40
20	6.31	170	-	7.80	31.0	28.30
22	15.15	140	-	7.82	32.0	28.00
24	16.60	150	-	7.94	32.0	25.20
26	15.23	160	-	7.85	31.0	25.80
28	20.45	150	-	7.91	31.0	28.00
30	18.13	150	5.32	7.87	32.0	27.00
32	16.84	140	4.86	7.91	32.0	27.00
34	15.77	130	6.25	8.01	33.0	27.90
36	12.83	120	6.49	7.98	31.5	27.80
38	21.28	160	7.48	8.00	31.0	31.70
40	33.15	130	7.12	7.98	32.0	30.00
42	31.19	140	6.49	7.95	34.0	28.30
44	118.76	120	7.24	7.88	32.0	29.70
46	60.72	150	6.89	7.84	33.0	30.00
48	59.87	110	6.54	7.94	31.0	28.00
50	83.81	130	6.54	7.98	31.0	30.00
52	96.19	120	7.40	8.04	30.0	28.90
54	150.94	120	6.54	8.13	34.0	28.80
56	133.78	90	6.38	8.17	34.0	30.90
58	67.93	80	6.53	8.32	30.0	29.60
60	52.79	160	6.57	8.34	35.0	27.80
62	21.37	180	6.90	8.14	35.0	26.90
65	27.23	180	6.54	8.03	35.0	28.80
67	29.62	170	6.54	7.99	35.0	28.00
69	28.64	160	7.40	8.04	34.0	25.70
72	16.02	170	6.70	8.06	34.0	28.10
74	21.85	150	6.32	7.98	34.0	27.00
76	23.87	150	7.09	8.02	35.0	27.20
79	23.44	160	6.61	7.90	31.0	25.00
81	15.15	165	6.59	7.94	30.0	26.70
83	22.77	160	6.56	7.89	30.0	28.90
86	36.61	160	6.58	7.49	29.0	24.20
88	22.03	150	6.61	7.81	31.0	27.00
90	26.22	150	7.24	8.07	30.0	26.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-3 น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการทดลอง

น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ								
จำนวน	ก่อนเริ่มทดลอง		30 วัน		60 วัน		90 วัน	
	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	5.73	8.50	17.91	13.20	13.53	12.20	15.87	11.50
2	6.29	8.50	9.83	10.80	12.92	11.40	21.05	12.90
3	12.76	11.00	10.26	11.20	12.38	10.90	11.58	11.40
4	8.43	10.40	10.71	11.10	15.80	11.90	21.98	13.40
5	8.43	9.80	11.63	11.10	21.10	13.40	14.73	11.90
6	10.60	10.70	12.68	12.00	15.36	11.90	14.37	11.00
7	5.21	8.40	11.87	11.80	16.18	12.10	19.99	12.50
8	7.72	9.30	14.10	11.30	13.23	10.90	27.47	13.20
9	7.20	9.60	9.21	10.30	19.32	12.10	20.66	13.00
10	6.37	9.20	9.02	10.20	13.45	10.90	22.25	13.00
11	5.95	8.70	17.39	12.50	13.71	11.50	13.28	10.50
12	5.14	8.30	13.26	11.50	16.56	11.50	13.14	10.70
13	6.29	9.20	6.35	9.60	24.64	12.90	19.19	11.90
14	6.05	8.90	9.10	10.50	18.53	11.10	16.55	11.80
15	8.15	10.00	15.77	12.20	9.61	10.30	19.05	12.50
16	6.68	9.00	8.94	9.90	13.01	10.60	23.32	12.00
17	8.15	9.90	9.94	10.20	15.20	11.40	17.21	12.10
18	10.90	10.28	12.58	10.70	17.18	11.80	18.94	11.90
19	7.50	9.60	10.70	10.40	13.67	10.80	16.92	11.70
20	7.55	9.70	12.78	11.60	13.02	10.90	19.58	12.10
21	5.10	8.30	7.46	9.60	13.07	10.80	19.99	12.40
22	9.49	10.50	11.80	10.90	11.45	10.20	17.12	11.60
23	5.24	8.50	12.84	11.60	16.82	12.20	18.59	12.00
24	5.54	9.00	10.07	11.10	17.30	11.30	14.92	10.90
25	5.73	8.50	8.67	10.00	14.10	10.90	-	-
26	4.74	7.90	6.80	9.60	17.82	11.90	-	-
27	6.29	8.80	6.71	8.90	-	-	-	-
28	5.22	8.10	8.65	9.80	-	-	-	-
29	4.56	8.10	-	-	-	-	-	-
30	5.31	8.40	-	-	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	6.94	9.17	10.97	10.84	15.34	11.45	18.24	12.00
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.99	0.86	2.98	1.00	3.23	0.77	3.68	0.78

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่								
จำนวน	ก่อนเริ่มทดลอง		30 วัน		60 วัน		90 วัน	
	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	7.95	9.70	12.48	11.80	16.57	11.80	21.74	12.70
2	6.22	9.30	13.34	11.80	12.10	10.60	23.42	13.50
3	7.24	9.70	10.94	11.20	16.34	11.00	23.44	13.50
4	5.03	8.20	13.38	10.50	16.79	12.80	25.85	13.50
5	7.95	9.90	11.75	11.10	20.09	13.10	21.01	13.10
6	8.22	9.70	13.96	11.80	17.73	12.30	16.57	11.90
7	7.33	8.90	10.39	10.50	20.67	13.80	26.42	14.00
8	8.73	9.70	14.42	12.10	17.05	12.50	28.90	14.10
9	6.07	8.70	9.01	10.10	16.78	12.20	22.23	13.00
10	6.87	9.10	10.77	10.80	17.81	11.70	19.96	12.80
11	5.16	7.80	11.73	11.40	17.52	12.00	14.23	11.10
12	6.92	9.20	8.04	9.80	15.01	12.00	25.10	13.00
13	5.63	8.60	16.94	12.50	16.41	11.30	18.05	12.60
14	6.33	9.00	13.12	12.10	13.58	11.20	23.43	13.30
15	7.35	9.20	15.70	12.30	14.22	11.50	21.58	12.80
16	8.63	8.80	12.83	11.40	19.33	12.60	21.16	12.60
17	7.87	9.80	11.98	11.30	12.22	10.30	17.60	11.90
18	8.55	9.80	15.36	12.50	20.03	12.80	21.44	12.90
19	7.83	9.50	9.35	9.70	16.88	11.50	19.09	11.80
20	10.51	10.80	10.74	11.20	18.36	12.40	20.58	12.30
21	8.07	9.60	5.94	9.00	18.97	12.50	22.05	12.80
22	9.81	10.30	13.51	11.70	19.39	12.20	15.75	11.30
23	10.03	10.40	8.40	9.90	20.55	12.80	18.79	12.00
24	6.16	9.20	11.11	11.10	17.81	11.70	28.13	13.50
25	4.78	8.20	10.52	11.10	16.88	11.50	28.00	14.00
26	6.71	8.80	-	-	-	-	-	-
27	9.29	9.90	-	-	-	-	-	-
28	7.38	9.60	-	-	-	-	-	-
29	5.57	8.60	-	-	-	-	-	-
30	8.17	9.80	-	-	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	7.41	9.33	11.83	11.15	17.16	12.00	21.78	12.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.49	0.68	2.56	0.93	2.37	0.80	3.88	0.81

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของกุ้งจากถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่หัวเชื้อตรึงแล้ว								
จำนวน	ก่อนเริ่มทดลอง		30 วัน		60 วัน		90 วัน	
	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	13.12	11.60	16.68	14.00	14.09	11.50	21.63	14.00
2	8.85	9.70	10.50	11.50	20.03	13.40	18.36	12.00
3	10.69	10.70	12.27	11.90	18.00	13.10	20.80	12.90
4	8.17	9.70	9.35	11.10	18.87	13.00	22.63	13.40
5	4.95	8.40	9.34	11.00	16.05	12.00	18.62	12.70
6	5.47	8.70	14.08	12.50	24.05	14.50	20.81	12.90
7	7.30	9.90	16.97	14.00	16.24	11.90	23.86	13.50
8	9.44	10.00	11.54	12.00	13.92	12.00	20.35	12.50
9	9.00	9.80	11.93	11.80	15.70	12.10	27.56	14.00
10	8.11	9.50	10.63	10.90	14.99	12.30	26.99	13.90
11	6.46	9.70	12.57	12.20	18.76	13.10	21.79	12.90
12	5.58	8.80	10.36	10.60	18.76	12.00	18.95	12.50
13	6.28	8.70	12.61	12.00	16.53	12.30	22.76	13.40
14	7.23	9.40	14.39	12.20	16.51	12.00	19.45	12.80
15	6.71	9.00	9.36	10.20	14.13	11.20	28.04	13.70
16	11.20	10.90	11.54	11.60	13.48	11.50	22.33	13.20
17	6.51	9.20	12.22	11.30	17.97	12.60	27.48	13.90
18	6.46	8.80	14.21	11.60	16.76	11.90	23.47	13.60
19	9.39	10.20	9.64	11.60	16.22	12.00	16.65	12.50
20	8.17	9.40	10.20	10.90	16.10	12.20	26.28	14.30
21	4.88	8.50	14.64	12.00	18.34	12.70	22.02	12.50
22	6.67	8.50	11.66	10.70	20.14	13.00	18.99	12.20
23	8.06	9.90	9.73	10.60	15.45	11.50	23.82	14.00
24	7.51	9.20	11.53	11.20	16.95	12.70	22.61	13.30
25	6.80	9.00	10.62	10.50	14.60	12.70	21.22	13.40
26	6.98	9.40	10.52	10.30	12.97	11.70	21.17	12.30
27	7.52	9.40	13.45	11.50	13.66	11.40	19.04	12.90
28	5.31	8.40	6.66	9.90	17.40	11.60	23.47	13.60
29	7.05	8.80	-	-	-	-	-	-
30	6.36	8.30	-	-	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	7.54	9.38	11.76	11.49	16.67	12.28	22.18	13.17
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.88	0.79	2.32	0.98	2.45	0.73	3.02	0.63

ตารางที่ 4- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากถังเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองใหม่และถังเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว

ตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก่อนเริ่มต้นการทดลองเลี้ยงกุ้ง							
วันที่	ชั่วโมงที่ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
3/6/51	0	2.81	0.00	0.26	0.00	0.62	0.01
4/6/51	15	2.65	0.07	0.33	0.04	1.09	0.03
5/6/51	24	2.17	0.05	0.22	0.01	1.29	0.01
6/6/51	72	1.49	0.09	0.63	0.08	1.00	0.06
7/6/51	92	1.26	0.03	0.74	0.09	0.95	0.11
8/6/51	114	1.14	0.03	1.12	0.19	0.99	0.20
9/6/51	137	0.90	0.12	1.45	0.13	0.82	0.08
10/6/51	160	0.70	0.22	1.23	0.22	0.90	0.11

ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ เมื่อเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 60 วัน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21/10/51	0	2.95	0.34	0.05	0.00	1.38	0.03
21/10/51	10	1.56	0.14	0.15	0.04	1.69	0.17
22/10/51	26	0.81	0.04	0.34	0.12	2.06	0.13
22/10/51	34	0.51	0.05	0.45	0.17	2.20	0.09
23/10/51	50	0.19	0.13	0.62	0.16	2.26	0.21
24/10/51	74	0.02	0.00	0.55	0.07	2.32	0.29
ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว เมื่อเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 60 วัน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
21/10/51	0	2.95	0.34	0.05	0.00	1.18	0.02
21/10/51	10	1.61	0.46	0.26	0.04	2.35	0.29
22/10/51	26	0.28	0.23	0.50	0.39	2.80	0.65
22/10/51	34	0.15	0.12	0.42	0.45	3.07	0.33
23/10/51	50	0.07	0.01	0.28	0.42	3.64	0.54
24/10/51	74	0.03	0.01	0.12	0.21	3.64	0.42
ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ เมื่อเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 90 วัน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11/11/51	0	2.86	0.09	0.01	0.01	1.61	0.02
11/11/51	8.5	1.69	0.04	0.13	0.03	2.05	0.07
12/11/51	23	0.87	0.13	0.16	0.08	2.47	0.13
12/11/51	31	0.64	0.15	0.44	0.09	3.08	0.30
13/11/51	49	0.05	0.05	0.36	0.06	3.37	0.66
ตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรงหัวเชื้อแล้ว เมื่อเลี้ยงกึ่งเป็นเวลา 90 วัน							
วันที่	ชั่วโมงที่ ทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11/11/51	0	2.86	0.09	0.01	0.01	1.61	0.02
11/11/51	8.5	1.30	0.11	0.20	0.02	2.54	0.13
12/11/51	23	0.04	0.04	0.04	0.02	3.79	0.50
12/11/51	31	0.03	0.02	0.03	0.02	3.86	0.16
13/11/51	49	0.00	0.00	0.02	0.01	3.95	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ  
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม SPSS

จ-1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อในตริไฟอิงแบคที่เรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆจากผลการทดลองที่ 4.1.1

Oneway

ANOVA

AmRR

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	30.646	1	30.646	148.477	.000
Within Groups	.826	4	.206		
Total	31.471	5			

Oneway

Descriptives

AmRR

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	3	13.6000	.42143	.24331	12.5531	14.6469
2.00	3	9.0800	.48497	.28000	7.8753	10.2847
Total	6	11.3400	2.50883	1.02423	8.7071	13.9729

Descriptives

AmRR

	Minimum	Maximum
1.00	13.20	14.04
2.00	8.64	9.60
Total	8.64	14.04

ANOVA

AmRR

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	30.646	1	30.646	148.477	.000
Within Groups	.826	4	.206		
Total	31.471	5			



จ-2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพใหม่ที่เหนี่ยวนำให้เกิดฟิล์มชีวภาพไนตริฟิเคชันจากหัวเชื้อที่ตรึงได้จากถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (BUU) และระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) ในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 จากผลการทดลองที่ 4.1.2 โดยวิธี t-Test: Paired Two Sample for Means

	BUU สัปดาห์ที่ 2	CU สัปดาห์ที่ 2
Mean	67.5422682	78.01332
Variance	383.037717	324.4004
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.89435668	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-2.0679986	
P(T<=t) one-tail	0.08727822	
	BUU สัปดาห์ที่ 4	CU สัปดาห์ที่ 4
Mean	57.39095	108.8669
Variance	169.3759	8.294614
Observations	3	3
Pearson Correlation	-0.94866	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-5.65266	
P(T<=t) one-tail	0.01495	
t Critical one-tail	2.919987	
	BUU สัปดาห์ที่ 6	CU สัปดาห์ที่ 6
Mean	81.85004	111.5047
Variance	5.093689	1367.375
Observations	3	3
Pearson Correlation	-0.63104	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-1.33612	

	BUU สัปดาห์ที่ 8	CU สัปดาห์ที่ 8
Mean	88.88403	91.44184
Variance	7.336253	10.29759
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.97361	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-5.26077	
P(T<=t) one-tail	0.017143	
t Critical one-tail	2.919987	

จ-3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มแบบต่างๆ จากผลการทดลองที่ 4.1.3

### Oneway

#### Descriptives

ARR

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	3	47.2000	1.86075	1.07431	42.5776	51.8224
2.00	3	39.4133	2.36011	1.36261	33.5505	45.2762
3.00	3	44.9200	5.71776	3.30115	30.7163	59.1237
Total	9	43.8444	4.73820	1.57940	40.2023	47.4866

#### Descriptives

ARR

	Minimum	Maximum
1.00	45.20	48.88
2.00	37.04	41.76
3.00	39.48	50.88
Total	37.04	50.88

#### Test of Homogeneity of Variances

ARR

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.645	2	6	.269

#### ANOVA

ARR

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	96.154	2	48.077	3.457	.100
Within Groups	83.451	6	13.908		
Total	179.605	8			

## ARR

Duncan<sup>a</sup>

SOURCE	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
2.00	3	39.4133	
3.00	3	44.9200	44.9200
1.00	3		47.2000
Sig.		.121	.482

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

จ-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (Two-way ANOVA) ของอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่บ่มในความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกันในเวลาต่างๆของการทดลองที่ 4.2

## Univariate Analysis of Variance

## Between-Subjects Factors

	N
Month 1.00	12
2.00	12
3.00	12
4.00	6
5.00	6
6.00	6
Conc .00	18
.50	9
2.00	18
10.00	9

## Descriptive Statistics

Dependent Variable: ARR

Month	Conc	Mean	Std. Deviation	N
1.00	.00	40.7547	3.45875	3
	.50	47.9663	11.11004	3
	2.00	53.2497	8.66145	3
	10.00	44.1927	14.73868	3
	Total	46.5408	10.06069	12
2.00	.00	59.2873	9.08608	3
	.50	47.0440	6.34906	3
	2.00	52.8303	43.37032	3
	10.00	113.7107	7.94318	3
Total	68.2181	33.89458	12	
3.00	.00	33.2913	6.46939	3
	.50	40.8387	7.16987	3
	2.00	34.5490	8.04369	3
	10.00	118.9100	6.69980	3
Total	56.8973	38.00254	12	
4.00	.00	48.2180	10.53075	3
	2.00	49.8953	9.58072	3
	Total	49.0567	9.05090	6
5.00	.00	109.5177	10.89126	3
	2.00	110.6083	2.28281	3
	Total	110.0630	7.06323	6
6.00	.00	82.3483	26.55877	3
	2.00	114.2137	21.01068	3
	Total	98.2810	27.62873	6
Total	.00	62.2362	29.28162	18
	.50	45.2830	8.06584	9
	2.00	69.2244	36.48381	18
	10.00	92.2711	37.23722	9
	Total	66.7459	33.45059	54

### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: ARR

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	50962.360 <sup>a</sup>	17	2997.786	12.938	.000
Intercept	242072.560	1	242072.560	1044.724	.000
Month	29889.382	5	5977.876	25.799	.000
Conc	15184.404	3	5061.468	21.844	.000
Month * Conc	10586.604	9	1176.289	5.077	.000
Error	8341.548	36	231.710		
Total	299874.647	54			
Corrected Total	59303.908	53			

a. R Squared = .859 (Adjusted R Squared = .793)

### Estimated Marginal Means

#### 1. Month

Dependent Variable: ARR

Month	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
1.00	46.541	4.394	37.629	55.453
2.00	68.218	4.394	59.306	77.130
3.00	56.897	4.394	47.985	65.809
4.00	49.057 <sup>a</sup>	6.214	36.453	61.660
5.00	110.063 <sup>a</sup>	6.214	97.460	122.666
6.00	98.281 <sup>a</sup>	6.214	85.678	110.884

a. Based on modified population marginal mean.

#### 2. Conc

Dependent Variable: ARR

Conc	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.00	62.236	3.588	54.960	69.513
.50	45.283 <sup>a</sup>	5.074	34.992	55.574
2.00	69.224	3.588	61.948	76.501
10.00	92.271 <sup>a</sup>	5.074	81.981	102.562

a. Based on modified population marginal mean.

#### 3. Month \* Conc

Dependent Variable: ARR

Month	Conc	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
1.00	.00	40.755	8.788	22.931	58.578
	.50	47.966	8.788	30.143	65.790
	2.00	53.250	8.788	35.426	71.073
	10.00	44.193	8.788	26.369	62.016
2.00	.00	59.287	8.788	41.464	77.111
	.50	47.044	8.788	29.220	64.868
	2.00	52.830	8.788	35.007	70.654
	10.00	113.711	8.788	95.887	131.534
3.00	.00	33.291	8.788	15.468	51.115
	.50	40.839	8.788	23.015	58.662
	2.00	34.549	8.788	16.725	52.373
	10.00	118.910	8.788	101.086	136.734
4.00	.00	48.218	8.788	30.394	66.042
	.50	<sup>a</sup>			
	2.00	49.895	8.788	32.072	67.719
	10.00	<sup>a</sup>			
5.00	.00	109.518	8.788	91.694	127.341
	.50	<sup>a</sup>			
	2.00	110.608	8.788	92.785	128.432
	10.00	<sup>a</sup>			
6.00	.00	82.348	8.788	64.525	100.172
	.50	<sup>a</sup>			
	2.00	114.214	8.788	96.390	132.037
	10.00	<sup>a</sup>			

a. This level combination of factors is not observed, thus the corresponding population marginal mean is not estimable.

## Post Hoc Tests

### Month

#### Homogeneous Subsets

ARR

Duncan<sup>a,b,c</sup>

Month	N	Subset		
		1	2	3
1.00	12	46.5408		
4.00	6	49.0567		
3.00	12	56.8973	56.8973	
2.00	12		68.2181	
6.00	6			98.2810
5.00	6			110.0630
Sig.		.207	.146	.130

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = 231.710.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 8.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

### Conc

#### Homogeneous Subsets

ARR

Duncan<sup>a,b,c</sup>

Conc	N	Subset		
		1	2	3
.50	9	45.2830		
.00	18		62.2362	
2.00	18		69.2244	
10.00	9			92.2711
Sig.		1.000	.268	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = 231.710.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 12.000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = .05.

จ-5 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่สู่มตัวอย่างมาจากถังชุดควบคุมที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพใหม่ และจากถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว ก่อนเริ่มต้นการทดลองและในวันที่ 60 และ 90 ของการทดลอง

#### Descriptives

ARR

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	3	30.0000	1.53206	.88453	26.1942	33.8058
2.00	3	94.4000	12.50440	7.21942	63.3374	125.4626
3.00	3	120.9600	12.61770	7.28483	89.6159	152.3041
4.00	3	100.3200	11.04978	6.37959	72.8708	127.7692
5.00	3	142.4000	3.27829	1.89272	134.2563	150.5437
Total	15	97.6160	39.93020	10.30993	75.5034	119.7286

ARR

	Minimum	Maximum
1.00	28.32	31.32
2.00	83.40	108.00
3.00	111.84	135.36
4.00	91.08	112.56
5.00	139.68	146.04
Total	28.32	146.04

#### Test of Homogeneity of Variances

ARR

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
3.033	4	10	.070

#### ANOVA

ARR

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	21420.380	4	5355.095	59.401	.000
Within Groups	901.517	10	90.152		
Total	22321.897	14			

#### Post Hoc Tests

##### Homogeneous Subsets

ARR

Duncan<sup>a</sup>

Bar	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
1.00	3	30.0000			
2.00	3		94.4000		
4.00	3		100.3200		
3.00	3			120.9600	
5.00	3				142.4000
Sig.		1.000	.463	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

จ-6 น้ำหนักเฉลี่ยของกึ่งขาวแวนนาไมจากถั่งเลี้ยงกึ่งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 0 ของการทดลอง

#### Descriptives

Weigth

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	30	6.9440	1.99249	.36378	6.2000	7.6880
2.00	30	7.4120	1.48718	.27152	6.8567	7.9673
3.00	30	7.5410	1.88170	.34355	6.8384	8.2436
Total	90	7.2990	1.79848	.18958	6.9223	7.6757

Weigth

	Minimum	Maximum
1.00	4.56	12.76
2.00	4.78	10.51
3.00	4.88	13.12
Total	4.56	13.12

**Test of Homogeneity of Variances**

Weigth

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.909	2	87	.407

**ANOVA**

Weigth

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.921	2	2.960	.913	.405
Within Groups	281.952	87	3.241		
Total	287.873	89			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

Weigth

Duncan<sup>a</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05
		1
1.00	30	6.9440
2.00	30	7.4120
3.00	30	7.5410
Sig.		.230

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.  
 a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 30.000.

จ-7 น้ำหนักเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 30 ของการทดลอง

**Descriptives**

Weigth

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	28	10.9654	2.98074	.56331	9.8095	12.1212
2.00	25	11.8284	2.56386	.51277	10.7701	12.8867
3.00	28	11.7571	2.31730	.43793	10.8586	12.6557
Total	81	11.5054	2.63436	.29271	10.9229	12.0879

Weigth

	Minimum	Maximum
1.00	6.35	17.91
2.00	5.94	16.94
3.00	6.66	16.97
Total	5.94	17.91

**Test of Homogeneity of Variances**

Weigth

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.938	2	78	.396

**ANOVA**

Weigth

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.549	2	6.274	.902	.410
Within Groups	542.638	78	6.957		
Total	555.187	80			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

Weigth

Duncan<sup>ab</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05
		1
1.00	28	10.9654
3.00	28	11.7571
2.00	25	11.8284
Sig.		.263

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 26.923.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

จ-8 นำหนักเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 60 ของการทดลอง

**Descriptives**

Weigth

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	26	15.3446	3.22805	.63307	14.0408	16.6485
2.00	25	17.1636	2.36691	.47338	16.1866	18.1406
3.00	28	16.6668	2.45337	.46364	15.7155	17.6181
Total	79	16.3889	2.78042	.31282	15.7661	17.0116



Weigth

	Minimum	Maximum
1.00	9.61	24.64
2.00	12.10	20.67
3.00	12.97	24.05
Total	9.61	24.64

## Test of Homogeneity of Variances

Weigth

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.390	2	76	.255

## ANOVA

Weigth

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	45.520	2	22.760	3.103	.051
Within Groups	557.475	76	7.335		
Total	602.995	78			

## Post Hoc Tests

## Homogeneous Subsets

Weigth

Duncan<sup>a,b</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
1.00	26	15.3446	
3.00	28	16.6668	16.6668
2.00	25		17.1636
Sig.		.081	.508

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 26.275.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

จ-9 น้ำหนักเฉลี่ยของกุ้งขาวแวนนาไมจากถังเลี้ยงกุ้งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 90 ของการทดลอง

## Descriptives

Weigth

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	24	18.2396	3.67559	.75028	16.6875	19.7916
2.00	25	21.7808	3.87955	.77591	20.1794	23.3822
3.00	28	22.1839	3.01985	.57070	21.0130	23.3549
Total	77	20.8236	3.89525	.44391	19.9395	21.7078

Weigth

	Minimum	Maximum
1.00	11.58	27.47
2.00	14.23	28.90
3.00	16.65	28.04
Total	11.58	28.90

**Test of Homogeneity of Variances**

Weigth

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.717	2	74	.491

**ANOVA**

Weigth

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	234.971	2	117.486	9.469	.000
Within Groups	918.176	74	12.408		
Total	1153.147	76			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

Weigth

Duncan<sup>a,b</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
1.00	24	18.2396	
2.00	25		21.7808
3.00	28		22.1839
Sig.		1.000	.684

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 25.558.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

จ-10 ความยาวเฉลี่ยของกึ่งขาวแวนนาไมจากถั่งเลี้ยงกึ่งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 0 ของการทดลอง

**Descriptives**

Length

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	30	9.1693	.85859	.15676	8.8487	9.4899
2.00	30	9.3267	.68478	.12502	9.0710	9.5824
3.00	30	9.3833	.78788	.14385	9.0891	9.6775
Total	90	9.2931	.77689	.08189	9.1304	9.4558

Length

	Minimum	Maximum
1.00	7.90	11.00
2.00	7.80	10.80
3.00	8.30	11.60
Total	7.80	11.60

**Test of Homogeneity of Variances**

Length

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.112	2	87	.334

**ANOVA**

Length

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.738	2	.369	.606	.548
Within Groups	52.979	87	.609		
Total	53.716	89			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

Length

Duncan<sup>a</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05
		1
1.00	30	9.1693
2.00	30	9.3267
3.00	30	9.3833
Sig.		.322

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 30.000.

จ-11 ความยาวเฉลี่ยของกึ่งขาวแวนนาไมจากถั่งเลี้ยงกึ่งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 30 ของการทดลอง

**Descriptives**

Length

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	28	10.8429	1.00127	.18922	10.4546	11.2311
2.00	25	11.1480	.92831	.18566	10.7648	11.5312
3.00	28	11.4857	.97590	.18443	11.1073	11.8641
Total	81	11.1593	.99534	.11059	10.9392	11.3793

Length

	Minimum	Maximum
1.00	8.90	13.20
2.00	9.00	12.50
3.00	9.90	14.00
Total	8.90	14.00

**Test of Homogeneity of Variances**

Length

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.186	2	78	.830

## ANOVA

Length

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.790	2	2.895	3.074	.052
Within Groups	73.465	78	.942		
Total	79.256	80			

## Post Hoc Tests

## Homogeneous Subsets

Length

Duncan<sup>ab</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
1.00	28	10.8429	
2.00	25	11.1480	11.1480
3.00	28		11.4857
Sig.		.252	.205

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 26.923.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

จ-12 ความยาวเฉลี่ยของกึ่งขาแวนนาไม่จากถึงเลี้ยงกึ่งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 60 ของการทดลอง

## Descriptives

Length

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	26	11.4538	.76745	.15051	11.1439	11.7638
2.00	25	12.0040	.80389	.16078	11.6722	12.3358
3.00	28	12.2821	.73235	.13840	11.9982	12.5661
Total	79	11.9215	.83369	.09380	11.7348	12.1083

Length

	Minimum	Maximum
1.00	10.20	13.40
2.00	10.30	13.80
3.00	11.20	14.50
Total	10.20	14.50

## Test of Homogeneity of Variances

Length

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.134	2	76	.875

## ANOVA

Length

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9.498	2	4.749	8.072	.001
Within Groups	44.715	76	.588		
Total	54.213	78			

**Post Hoc Tests**

**Homogeneous Subsets**

**Length**

Duncan<sup>a,b</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
1.00	26	11.4538	
2.00	25		12.0040
3.00	28		12.2821
Sig.		1.000	.193

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 26.275.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

จ-13 ความยาวเฉลี่ยของกึ่งขาแวนนาไมจากถั่งเลี้ยงกึ่งทั้งสามชุดการทดลองในวันที่ 90 ของการทดลอง

**Descriptives**

Length

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1.00	24	11.9958	.77934	.15908	11.6667	12.3249
2.00	25	12.8000	.80881	.16176	12.4661	13.1339
3.00	28	13.1714	.63413	.11984	12.9255	13.4173
Total	77	12.6844	.88020	.10031	12.4846	12.8842

Length

	Minimum	Maximum
1.00	10.50	13.40
2.00	11.10	14.10
3.00	12.00	14.30
Total	10.50	14.30

**Test of Homogeneity of Variances**

Length

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.227	2	74	.797

**ANOVA**

Length

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18.355	2	9.177	16.757	.000
Within Groups	40.527	74	.548		
Total	58.881	76			

## Post Hoc Tests

### Homogeneous Subsets

#### Length

Duncan<sup>a,b</sup>

Treatment	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
1.00	24	11.9958	
2.00	25		12.8000
3.00	28		13.1714
Sig.		1.000	.077

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- Uses Harmonic Mean Sample Size = 25.558.
- The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมนวิกานต์ ขจรบุญ เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน 2526 ที่จังหวัดนครสวรรค์ ได้รับการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนสตรีนครสวรรค์ และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2548 และได้รับการคัดเลือกเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 โดยขณะที่ศึกษานั้นได้รับทุนสนับสนุนโครงการทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนการวิจัยจาก ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

มนวิกานต์ ขจรบุญ, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, ตะวัน ลิมปิยากร และสรวิศ เผ่าทองสุข. (2551) การคัดแยกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7 วันที่ 7-9 มีนาคม 2551 ณ สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)

Kajohnboon, M., Pungrasmi, W., Limpiyakorn, T. and Powtongsook, S. (2008). Effect of Ammonium Concentrations on Ammonia Removal Rate of Acclimated Nitrification Media. **Forum on Fishery Science and Technology-A Serial Forum of Engineering and Technology of Chinese Academy of Engineering**, Shanghai, China, September 26-28, 2008. (Oral presentation)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย